

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID



TRABAJO FIN DE GRADO:
Estudio de la onda de choque normalizada
aplicada a diferentes equipos inductivos

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Autor: José Antonio Algar Parrilla

Tutor: Juan Manual Martínez Tarifa

Septiembre 2015



Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia por estar conmigo durante los últimos 4 años y sobretodo en estos últimos meses durante la realización de este trabajo, especialmente a mi hermana que ha sido la que más ha sufrido las consecuencias.

A mi tutor Juan Manuel Martínez Tarifa por su amabilidad desde el primer día hasta el último. Por la ayuda recibida con rapidez, por su apoyo y por su puesto por darme la oportunidad de desarrollar este proyecto.

Y por último al técnico de laboratorio Ángel Manuel Gómez Solanilla por su amabilidad y predisposición para realizar las medidas necesarias.



Índice

1	Introducción y objetivos	9
2	Principios del ensayo de onda de choque en aislamiento de máquina rotativa	11
2.1	Introducción a sistemas de aislamiento	11
2.1.1	Materiales gaseosos	11
2.1.2	Materiales sólidos	15
2.1.3	Sistemas de aislamiento de máquinas rotativas	19
2.2	Aislamiento ante ondas transitorias	20
2.2.1	Ensayo clásico o convencional	20
2.2.2	Ensayos en máquinas rotativas (surge test)	21
2.3	Surge test	26
2.3.1	Campo de aplicación	26
2.3.2	Condiciones de servicio	27
2.3.3	Dispositivos sugeridos para el ensayo	27
2.3.4	Secuencia de ensayo	28
2.3.5	Niveles de tensión del ensayo para bobinas nuevas	28
2.3.6	Ensayos de mantenimiento o ensayos de máquinas en servicio	30
2.3.7	Procedimiento de ensayo y métodos	30
3	Montaje experimental	34
3.1	Introducción del equipo de generación de transitorios MTC2	34
3.1.1	Campo de aplicación del equipo MTC2	34
3.2	Instrumentación y conexiones	41
4	Caracterización de la onda de choque del equipo MTC2	51
4.1	Motor asíncrono 1	51
4.1.1	Ensayo a 800 V	51
4.1.2	Ensayo a 1000 V	54
4.1.3	Ensayo a 1500 V	57
4.2	Motor asíncrono 2	61



4.2.1	Ensayo a 800 V	61
4.2.2	Ensayo 1000 V	64
4.2.3	Ensayo 1500 V	67
4.3	Ensayo del devanado de baja tensión del transformador	71
4.3.1	Ensayo a 800 V	72
4.3.2	Ensayo a 1000 V	75
4.3.3	Ensayo a 1200 V	78
4.4	Ensayo del devanado de alta del transformador	81
4.4.1	Ensayo a 3000 V	82
4.4.2	Ensayo a 10000 V:	85
4.5	Comparación de resultados entre todas las máquinas	89
5	Conclusiones	91
6	Presupuesto	92
7	Bibliografía	93
8	ANEXO 1	94

Índice de figuras

2.1 Mecanismo de ionización	12
2.2 Mecanismo serpentina (de [Kuffel, 2000]).....	13
2.3 Evolución del campo de ruptura con el tiempo de servicio en aislamiento sólido (de [Martínez-Velasco, 2008])	16
2.4 Arborescencia creada en un defecto de borde	18
2.5 Arborescencias creadas en una cavidad de aislamiento sólido	18
2.6 Capas de un aislamiento [Stone, 2004]	20
2.7 Formas de onda normalizadas [UNE-EN 60071-1, «Coordinación de aislamiento. Parte 1: Definiciones, principios y reglas», 2006.]	21
2.8 Forma de onda proveniente del convertidor [Guía técnica de WEG]	22
2.9 Esquema RCL (de [Stone, 2004]).....	23
2.10 Ubicación de las espiras inductora y sonda sobre la bobina ensayada (de [IEEE std 522,1992]).....	24
2.11 Superposición de sobretensiones. [De IEEE std 522,1992]	24
2.12 Interpretación de las oscilaciones de tensión. (De [Gill, 1998]).....	25
2.13 Impulso eléctrico para resistencia de aislamiento	29
2.14 Alternativa del impulso eléctrico para la resistencia del aislamiento.....	30
2.15 Circuito del ensayo	31
2.16 Forma de onda de cortocircuitos y ensayo normal de bobina conectado en el hierro	33
3.1 Equipo MTC2	34
3.2 Advertencia de seguridad.....	36
3.3 Pantalla inicial.....	37
3.4 Botones tipo de conexión.....	37
3.5 Surge test 1-4.....	38
3.6 Guardar el ensayo.....	39
3.7 Pantalla crear informes	39
3.8 Pantalla de resultados individuales de cada ensayo.	40
3.9 Impresión del informe.	40
3.10 Osciloscopio LeCroy.....	42
3.11 Pinza Kelvin	43
3.12 Pulsador de pie	43
3.13 Transformador.....	44
3.14 Motor asíncrono 1 con las pinzas de ensayo conectadas	45
3.15 Motor asíncrono 2	46
3.16 Conexión estrella-triángulo	47
3.17 Conexión motor 1.....	47
3.18 Conexión transformador de baja tensión	49



3.19 Conexionado del devanado de alta del transformador	50
4.1 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 800 V	52
4.2 Registro en MTC2 del ensayo individual (fase1) a 800 V	52
4.3 Oscilograma del transitorio de 800 V para 50 μ s/div.....	53
4.4 Oscilograma del transitorio de 800 V para 1 μ s/div.....	54
4.5 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 1000V.....	55
4.6 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 1000 V	55
4.7 Oscilograma del transitorio de 1000 V para 50 μ s/div.....	56
4.8 Oscilograma del transitorio de 1000 V para 1 μ s/div.....	57
4.9 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 1500 V	58
4.10 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 1500 V	58
4.11 Oscilograma del transitorio de 1500 V para 50 μ s/div.....	59
4.12 Oscilograma del transitorio de 1500 V para 1 μ s/div.....	60
4.13 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 800 V.....	62
4.14 Registro MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 800 V	62
4.15 Oscilograma del transitorio de 800 V para 50 μ s/div.....	63
4.16 Oscilograma del transitorio de 800 V para 1 μ s/div.....	64
4.17 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 1000 V	65
4.18 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 1000 V	65
4.19 Oscilograma del transitorio de 1000 V para 1 ms/div.....	66
4.20 Oscilograma del transitorio de 1000 V para 1 μ s/div.....	67
4.21 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 1000 V	68
4.22 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 1000 V	68
4.23 Oscilograma del transitorio de 1500 V para 0.1 ms/div.....	69
4.24 Oscilograma del transitorio de 1500 V para 1 μ s/div.....	70
4.25 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 800 V	72
4.26 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 800 V	73
4.27 Oscilograma del transitorio de 800 V para 10 μ s/div.....	74
4.28 Oscilograma del transitorio de 800 V para 2 μ s/div.....	74
4.29 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 1000 V.....	76
4.30 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 1000 V	76
4.31 Oscilograma del transitorio de 1000 V para 10 μ s/div.....	77
4.32 Oscilograma del transitorio de 1000 V para 2 μ s/div.....	77
4.33 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 1200 V	79
4.34 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 1200 V.....	79
4.35 Oscilograma del transitorio de 1200 V para 10 μ s/div.....	80
4.36 Oscilograma del transitorio de 1200 V para 2 μ s/div.....	80
4.37 Registro en MTC 2 del ensayo secuencial (3 fases) a 3000 V	82
4.38 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 3000 V	83
4.39 Oscilograma del transitorio de 3000 V para 2 ms/div.....	84
4.40 Oscilograma del transitorio de 3000 V para 10 ms/div.....	84



4.41 Oscilograma del transitorio de 3000 V para 0.5 μ s/div.....	85
4.42 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 10000 V	86
4.43 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 10000 V	86
4.44 Oscilograma del transitorio de 10000 V para 10 ms/div.....	87
4.45 Oscilograma del transitorio de 10000 V para 2 ms/div.....	88
4.46 Oscilograma del transitorio de 10000 V para 0.5 μ s/div.....	88



Índice de Tablas

Tabla 1 Característica del osciloscopio.....	42
Tabla 2 Característica del Transformador	44
Tabla 3 Característica del Motor asíncrono 2	45
Tabla 4 Resumen del MTC2	51
Tabla 5 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio	53
Tabla 6 Resumen del MTC2 a 1000 V	54
Tabla 7 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio	56
Tabla 8 Resumen del MTC2 a 1500 V	57
Tabla 9 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio	59
Tabla 10 Resultados de los distintos ensayos	60
Tabla 11 Resumen del MTC2 a 800 V	61
Tabla 12 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio	63
Tabla 13 Resumen del MTC2 a 1000 V	64
Tabla 14 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio	66
Tabla 15 Resumen del MTC2 a 1500 V	67
Tabla 16 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio	70
Tabla 17 Resultados de los distintos ensayos	71
Tabla 18 Resumen del ensayo a 800 V	72
Tabla 19 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio	75
Tabla 20 Resumen del MTC2 a 1000 V	75
Tabla 21 Parámetros del registro en el osciloscopio	76
Tabla 22 Resumen del ensayo a 1200 V	78
Tabla 23 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio	79
Tabla 24 Resultados de los distintos ensayos	81
Tabla 25 Resumen del MTC2 a 3000 V	82
Tabla 26 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio	83
Tabla 27 Resumen del MTC2 a 10000 V	85
Tabla 28 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio	87
Tabla 29 Resultados de los distintos ensayos	89
Tabla 30 Presupuesto	92

1 Introducción y objetivos

Un fallo inesperado de una máquina rotativa puede dar lugar a graves pérdidas económicas, en ámbitos clave como la minería, o cadenas de montaje. Estos fallos se producen en muchas ocasiones aunque la máquina no se vea sometida a esfuerzos superiores a los valores nominales que puede soportar. En el caso de los motores eléctricos de baja tensión, el uso de inversores electrónicos ha dado lugar a una mayor tasa de fallos de los mismos, puesto que estos inversores producen sobretensiones repentinas.

Con el objeto de anticiparse a estos fallos, hay diversas técnicas de detección de dichos fallos. Una de ellas es el uso de la onda de choque ("*surge Test*"), que se realiza para certificar que la máquina no posee cortocircuitos entre espira, los cuales pueden producir que la máquina no funcione correctamente y reducir drásticamente la vida útil de la misma. Otro aspecto menos importante por lo que se realiza este ensayo, es como medida de seguridad, puesto que funcionamiento incorrecto de la máquina puede crear situaciones inesperadas y por tanto ser peligroso para el operario que manipule la máquina.

En el laboratorio de investigación y ensayos en alta tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III de Madrid, existe un equipo comercial para realizar estas pruebas, pero se desconocían parámetros importantes de los impulsos aplicados, como su magnitud y tiempo de conmutación, así como su posible dependencia con la carga sobre la que se aplicaba. Esto provocaba dudas entre su personal técnico, especialmente cuando se quería aplicar el estándar IEEE Std 522-1992, dudas que quiso despejar desarrollando este trabajo.

En este trabajo, se ha realizado un estudio sobre el efecto que produce una onda de choque en diferentes equipos inductivos. El ensayo realizado ha consistido en la aplicación de diferentes impulsos de tensión en dos motores y en los devanados de alta y baja tensión de un transformador y en observar el efecto que produce dicho impulso, calculando los parámetros de la onda producida, como la tensión pico, tensión pico a pico, frecuencia de oscilación, tiempo de estabilización de la onda, y su tiempo de conmutación ("*rise time*"), y así poder caracterizar cada onda obtenida. Estos parámetros se compararon con los aportados por el interfaz *software* del equipo comercial.

Como fruto de los resultados obtenidos, el personal técnico del laboratorio será capaz de aplicar mejor el estándar IEEE Std 522-1992, evitando aplicar tensiones demasiado



bajas (con escasa información diagnóstica) o altas (que pueden dar lugar a fallos no esperados) sobre motores bajo prueba.

2 Principios del ensayo de onda de choque en aislamiento de máquina rotativa

2.1 Introducción a sistemas de aislamiento

La función principal de un aislamiento es separar partes a distinto potencial (conductores, chapas). Hay diversos materiales aislantes, que se pueden distinguir según su estado físico: gaseoso, sólido y líquido. En el caso de máquinas rotativas, solamente los dos primeros están presentes (contaminantes aparte), por lo que algunos fundamentos sobre los mismos se explican a continuación.

2.1.1 Materiales gaseosos

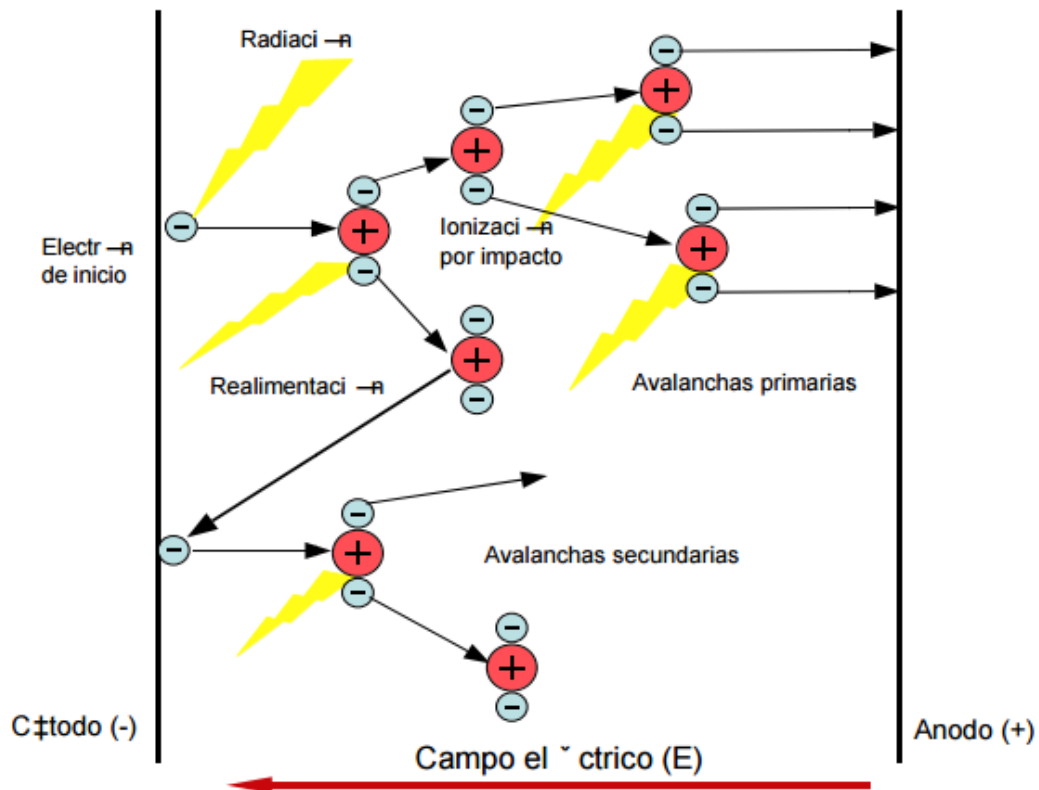
2.1.1.1 Mecanismos de ionización

Los Mecanismos de ionización son los fenómenos que explican la ruptura total o parcial de un sistema de aislamiento sólido-gas. Es el más habitual en máquinas eléctrica rotativas.

2.1.1.1.1 Mecanismo Townsend

Este fenómeno se produce en aislamientos con gas a baja presión (1-10mbar) en espacios abiertos o en pequeñas cavidades inmersas en aislamientos sólidos.

Cuando un aislamiento gaseoso está sometido a un campo eléctrico muy por debajo del de ruptura (rigidez dieléctrica), la densidad de carga libre que pudiera haber se recombina con iones positivos, dándose un equilibrio de cargas libres. Al aumentar la tensión, se aceleran los electrones, lo que produce un aumento de la corriente. Por encima de un determinado nivel de tensión, la aceleración de los electrones es tan alta, que producen ionizaciones de moléculas neutras por colisión, dando lugar a un aumento exponencial de la corriente que atraviesa el aislamiento. Este incremento de corriente se debe inicialmente a la mera colisión de electrones (ionización primaria), mientras que cerca de la tensión disruptiva, se produce la ionización secundaria, que es el bombardeo de iones en cátodo liberando más electrones y emisiones fotónicas que generan más electrones, (ionización secundaria)[Kuffel, 2000].



2.1 Mecanismo de ionización

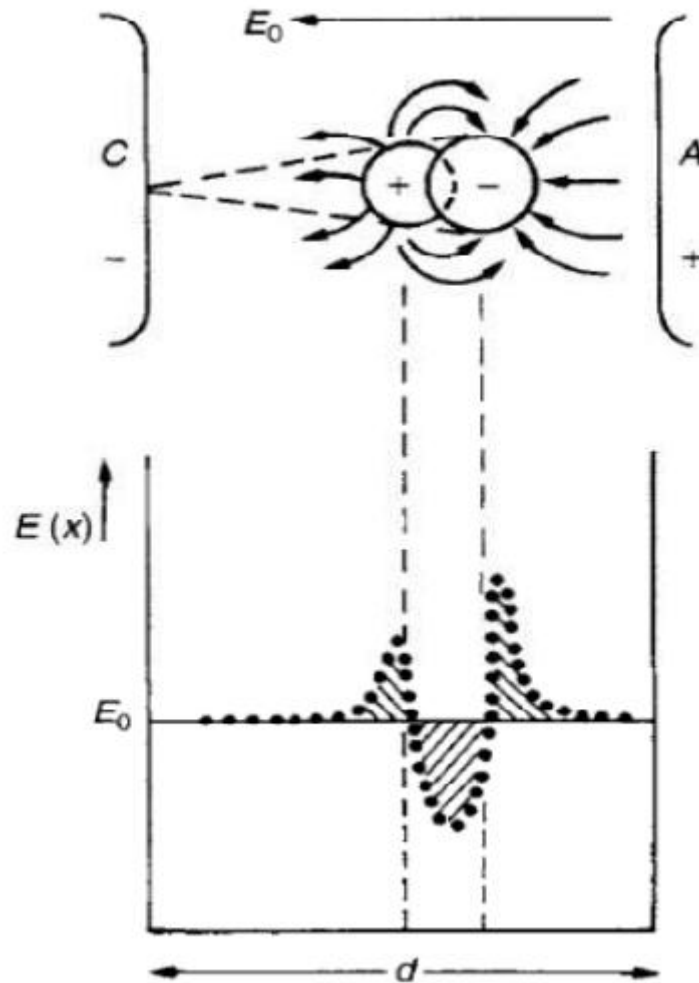
2.1.1.1.2 Mecanismo "serpentina" *streamer*

Se produce para $P \cdot d > 5 \text{ bar} \cdot \text{mm}$, lo que supone distancias superiores a 1cm a presión atmosférica o algunos mm para aire comprimido. Las principales diferencias entre mecanismos son:

- Tiempos disruptivos diferentes.
- U_b^1 no depende del material del cátodo para *streamer*.
- Canales de descarga disruptiva puntiagudos para *streamer*.
- Temperatura de descarga muy elevada para *streamer*.

La descarga disruptiva se produce por acumulación de carga espacial en la avalancha, transformándose en un canal de corriente. Los electrones iniciales provocan una avalancha, cuyos electrones generados llegan al ánodo dejando tras de sí iones positivos lentos que son carga acumulada para el gas y que distorsionan, en gran medida, el campo externo aplicado. Cuando alcanzan una densidad elevada, el campo inducido por las mismas es del orden del externo aplicado, dando lugar a nuevas ionizaciones y recombinaciones ión-electrón que generan fotones. La consecuencia final es que aparecen avalanchas secundarias que generan un gas fuertemente ionizado.

¹ U_b : tensión de ruptura



2.2 Mecanismo serpentina (de [Kuffel, 2000])

Esto supone, al final, la creación del “*streamer*” que dará lugar a carga espacial acumulada que se extenderá progresivamente desde el ánodo al cátodo en forma de filamentos de carga. Típicamente generan una luz UV y calor (chispa). La rigidez dieléctrica es el campo que puede soportar un aislante antes de que se produzca su ruptura completa [Kuffel, 2000].

2.1.1.1.3 Carácter estadístico de la ruptura dieléctrica

Como se ha visto anteriormente, la ruptura de un aislamiento a un determinado nivel de tensión, depende de la disponibilidad de los electrones libres que pueden provenir de la ionización natural. Por tanto, existe una cierta dispersión de resultados lo que afecta a la tensión de ruptura o perforación, o al tiempo necesario hasta la perforación, estos resultados deben ser siempre considerados como variables aleatorias. Estas variables aleatorias como se describen mejor son mediante la función *Weibull*.

2.1.1.2 Aire como aislamiento eléctrico

2.1.1.2.1 Influencia de la divergencia de campo eléctrico.

-Campos Homogéneos: La tensión disruptiva coincide con la tensión de inicio de descargas parciales.

-Campos no homogéneos: Es la configuración más real. El principal mecanismo es el *Streamer*. Suele dar lugar a ionizaciones parciales para tensiones inferiores a las de la ruptura total de aislamiento. Cuando la inhomogenidad es muy grande, estas descargas (parciales) se llamaran efecto Corona.

2.1.1.2.2 Influencia de la forma de onda de la tensión

La tensión disruptiva en campos homogéneos apenas se ven afectadas por la forma de onda o la polaridad de la tensión aplicada. A continuación se realiza un análisis con campos no homogéneos.

-Tensión continua: La polaridad de la tensión aplicada, afecta al fenómeno físico. Las descargas parciales dan lugar a una luz blanca-azulada para tensión positiva mientras que ésta será rojiza para tensión negativa.

En la estructura punta-plano a presión atmosférica, la tensión disruptiva es inferior para la polaridad positiva que para la polaridad negativa, siendo este efecto más acusado conforme la distancia punta-plano crezca. Esto se debe al diferente comportamiento de electrones e iones positivos.

En la estructura punta-punta a presión atmosférica, la tensión disruptiva es igual para una polaridad u otra.

-Tensión alterna: Los cambios de polaridad provocan modificaciones en las tensiones de ionización, debido a que éstas se verán alteradas por la carga espacial remanente del semiciclo anterior. Como se ha mencionado anteriormente, para las configuraciones punta-plano se podrían producir corona en ambas polaridades, siendo más posibles en el semiciclo positivo.

-Impulsos de tensión de frente lento (maniobra): Los valores de los tiempos normalizados de estos transitorio son: 250 μ s de frente y 2500 μ s de cola. En general, la tensión disruptiva para impulsos de tensión positivos, es inferior al valor de cresta de U_b para AC.

Los impulsos de polaridad positiva, presentan una dependencia muy marcada con la geometría, mientras los impulsos de polaridad negativa no dependen de la geometría de los electrodos.

-Impulsos de tensión de frente rápido (rayo): la duración del transitorio en esta forma de onda es mucho más pequeña, con 1.2 μ s de tiempo de frente ("*rise time*") y 50 μ s

en cola ("*fall time*"). Casi siempre la ruptura se produce en un instante posterior al valor cresta, aunque solamente los transitorios de tensión de muy alto valor de cresta son capaces de producir la ruptura antes del valor de cresta. El tiempo de descarga disruptiva depende del tiempo de aparición de descarga corona, tiempo de propagación del *streamer* y tiempo de propagación del canal.

Como se puede apreciar la rigidez dieléctrica cambia según sea el tipo de forma de onda de tensión aplicada. Por este motivo se debe caracterizar la onda producida por el surge test.

2.1.1.2.3 Influencia de la condiciones atmosférica

Según las condiciones atmosféricas el valor de la rigidez eléctrica puede variar, modificando algunos de los siguientes aspectos: presión, humedad y temperatura; seremos capaces de aumentar o disminuir la rigidez eléctrica. Otros aspectos que hay que tener en cuenta, porque reduce la U_d , es la contaminación, por la gran cantidad de partículas que se encuentran en suspensión.

2.1.1.3 Superficies aislantes expuestas a la intemperie

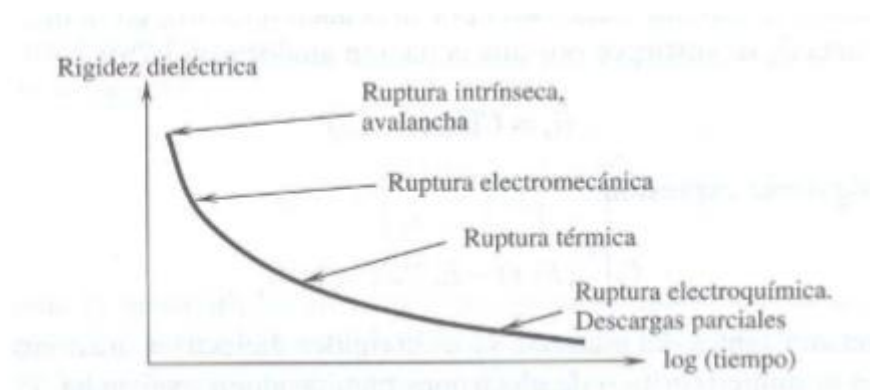
Las superficies de los aislamientos sólidos en instalaciones a la intemperie (cadenas de aisladores, aisladores en suspensión, aisladores soporte, aisladores pasantes...) están expuestas a agentes externos (lluvia, nieve, humedad, contaminación, salinidad, ciclos térmicos...) que envejecen el aislamiento y reducen notablemente E_b .

U_b es inferior a la que habría para distancias libres en aire especialmente para tensión AC y maniobras. En sobretensiones, tipo rayo, su influencia es menor. Algunas de los agentes que causan la disminución del U_b son la lluvia y la polución. En el caso de maquinaria rotativa, la acumulación de contaminantes en cabezas de bobina o pasatapas pueden dar lugar a tensiones de ruptura inferiores a las esperadas en sus sistemas de aislamiento.

2.1.2 Materiales sólidos

Los materiales sólidos poseen valores mayores de E_b que los gases y muchos líquidos, pero sus principales desventajas son, que tras sufrir una descarga no son reutilizables y que al no fluir por gradientes térmicos son muy susceptibles al envejecimiento térmico.

Los mecanismos de degradación de los materiales sólidos afectan a su rigidez dieléctrica, que se ve reducida con el tiempo, siendo poco probable la ruptura intrínseca o electromecánica. Normalmente, para que se produzca una ruptura suele haber una superposición de varios mecanismos de degradaciones simultáneos.



2.3 Evolución del campo de ruptura con el tiempo de servicio en aislamiento sólido (de [Martínez-Velasco, 2008])

2.1.2.1 Ruptura intrínseca

Es la aplicación de campos eléctricos superiores al campo de ruptura durante un periodo muy breve de tiempo. Normalmente los valores de estos campos son superiores a 100 MV/mm, por lo que este fenómeno es poco probable [Kuffel, 2000].

2.1.2.2 Ruptura electromecánica

Esta ruptura puede ser de dos tipos:

- Tensión mecánica endógena: se produce cuando se aplica una tensión en un aislante sólido, que provoca una fuerza de atracción entre los electrodos que comprimen el aislamiento. Si esta fuerza es demasiado fuerte puede llegar a dañar la estructura del aislamiento.
- Tensión mecánica exógena: se produce cuando las tensiones mecánicas provocan degradación por fricción y rozamiento de las cubiertas aislantes de los devanados, que producen una reducción de las prestaciones de los aislantes. Este esfuerzo es muy común en máquinas eléctricas rotativas [Stone, 2004]. Es extraño que provoquen la ruptura del material, pero bastante común que la degraden.

2.1.2.3 Ruptura térmica

La ruptura térmica se produce cuando no es posible encontrar el punto de equilibrio térmico (potencia generada se iguala a la potencia disipada) o éste aparece a un temperatura excesiva. Hay dos motivos por el cual no se pueda encontrar ese equilibrio:

- Calentamiento por efecto del campo eléctrico: se produce cuando se aplica un campo eléctrico a un dieléctrico, que genera una corriente, que calienta el aislamiento y lo degrada.
- Calentamiento por agentes externos: se produce por la temperatura ambiente, y cuando el sistema trabaja con corrientes elevadas, que añade calor al sistema de aislamiento por efecto Joule.

Este tipo de esfuerzo es igualmente muy común en máquinas rotativas. Aunque es complicado que un exceso de carga de la máquina le lleve hasta temperaturas excesivas, sí es bastante habitual que éste sean suficientes para degradar sus aislamientos [Stone, 2004].

2.1.2.4 Ruptura química y electroquímica

Las descargas eléctricas producidas en las partes conductoras y aislantes producen la descomposición química de los materiales. Cuando se produce una descarga eléctrica en presencia del aire, se produce ozono que ataca a los materiales de caucho o goma y ácido nítrico que produce una pérdida de la elasticidad del material.

La simple presencia del aire o oxígeno en la goma o en el polietileno provoca su oxidación, produciendo un aumento de corriente superficial y su descomposición química asociada.

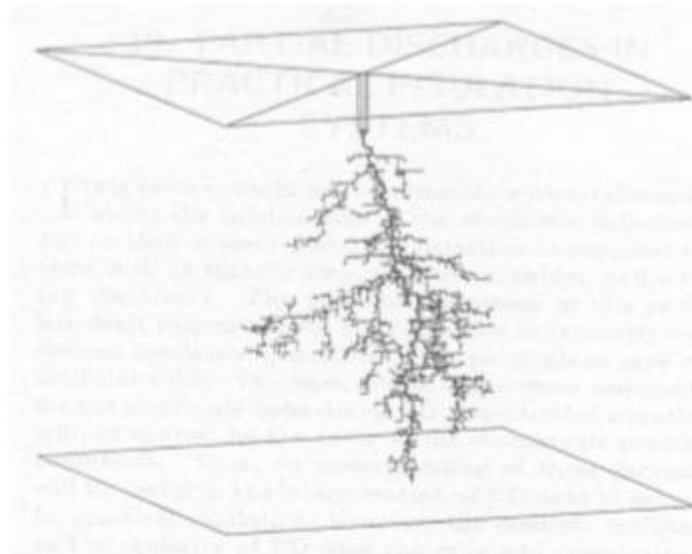
La presencia de humedad también provoca las pérdidas de las propiedades aislantes, reduciendo su vida útil. Estos fenómenos se aceleran con altas temperaturas e intensos campos eléctricos.

También se puede producir la degradación de los dieléctricos en ausencia de campos eléctricos, gracias a una gran variedad de procesos químicos derivados de las altas temperaturas, oxidación, contaminación, humedad o el simple contacto entre materiales aislantes que pueden provocar reacciones químicas.

En el caso de máquinas eléctricas, la presencia de polvo, insectos y estos agentes químicos pueden degradar severamente sus sistemas de aislamiento [Stone, 2004].

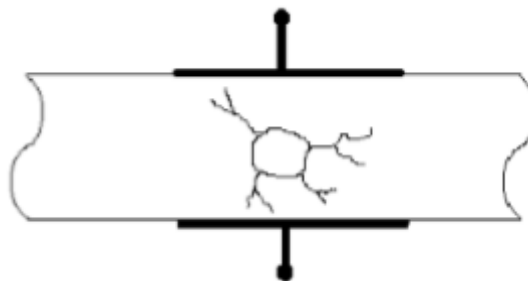
2.1.2.5 Ruptura por corrientes superficiales y descargas parciales

- Corrientes superficiales: son caminos conductores, estos se forman en la superficie de un aislante o en la capa de contaminación, que se produce en entornos con alta contaminación y/o humedad. Éstas corrientes producen la carbonización del aislante [Kuffel, 2000].



2.4 Arborescencia creada en un defecto de borde

- Descargas parciales: se produce cuando existe una imperfección gaseosa en el seno de un aislamiento sólido. Ésta tiene menor rigidez eléctrica que el resto del dieléctrico, de forma que, cuando el campo eléctrico supera esta rigidez eléctrica aparece una ionización de baja energía que produce una erosión del aislante sólido circundante. El fenómeno no da lugar a fallos inmediatos, pero sí a envejecimiento prematuro [Stone, 2004].



2.5 Arborescencias creadas en una cavidad de aislamiento sólido

2.1.2.6 Factores ambientales

Son un conjunto de factores que rodea el entorno de la máquina, pudiendo perjudicar al aislamiento. Algunos de estos factores son:

- Humedad condensada en los devanados.
- Productos químicos agresivos.
- Las partículas abrasivas en el aire o hidrógeno utilizadas en la refrigeración.
- Las partículas de desgaste de las zapatas o desgaste de la escobillas de carbón.
- La suciedad y residuos que entran en las máquinas del medio ambiente, tales como insectos, ceniza, polvo...

- Radiación [Stone, 2004].

2.1.3 Sistemas de aislamiento de máquinas rotativas

Las máquinas eléctricas rotativas se pueden clasificar según sus tipos de devanados:

Devanados aleatorios o de hilo: Estos devanados se utilizan para máquinas con una potencia inferior a 400 Kw y una tensión inferior a 1000 V. Consiste en conductores de cobre aislado, que se enrollan a través de las ranuras del núcleo del estator de manera aleatoria.

Devanados ordenados o de pletina: Son utilizados para máquinas de gran potencia y alta tensión. Tales devanados son fabricados a partir de bobinas aisladas que han sido preformadas antes de la inserción en las ranuras del núcleo del estator. Poseen un diseño muy cuidadoso, que garantiza que cada espira en una bobina adyacente tenga una diferencia de voltaje lo más pequeña posible [Stone, 2004].

Los sistemas de aislamiento principales de máquinas rotativas son:

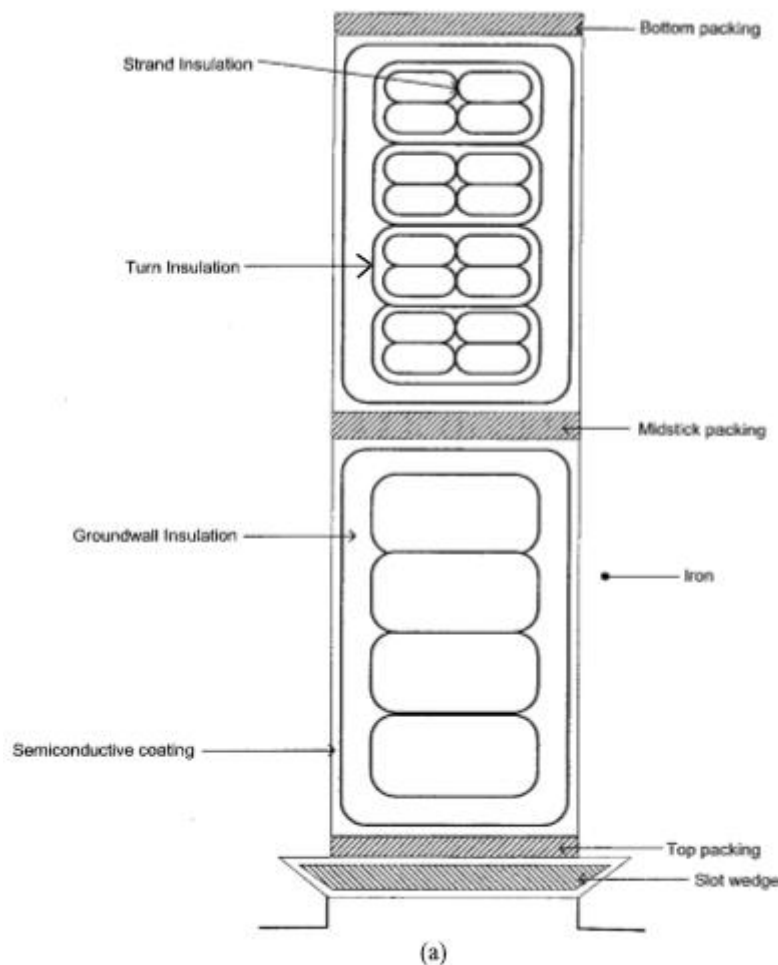
Aislamiento de hilo (Strand Insulation): Se trata del recubrimiento exterior de cada hilo, que forma la bobina, el cual separa los hilos conductores evitando, el llamado efecto piel (que se produce cuando un conductor es demasiado grueso y la corriente eléctrica no circula por toda la sección del conductor).

Aislamiento de espira (turn insulation): Es el material aislante que recubre una espira. Se encuentra alrededor de los apilamientos de cobre y se utiliza sobre todo cuando las espiras están formadas por varios conductores. En caso de que este aislamiento separe bobinas de diferentes fases, tendrá mayor rigidez dieléctrica. Para este tipo de aislantes, se utilizan laminados fabricados a partir de barnices y resinas [Blázquez, 2010].

Aislamiento a tierra (groundwall insulation): es el componente que separa el conductor de cobre, con el núcleo del estator conectado a tierra. Un fallo de aislamiento a tierra provoca que el motor o el generador queden fuera de servicio. Para que este aislamiento tenga una larga vida debe ser diseñado según especificaciones eléctricas, térmicas y mecánicas:

- Diseño eléctrico: El aislamiento a tierra al igual que el aislamiento de espira es básico.
- Diseño térmico: El aislamiento a tierra tiene que ser diseñado para ser capaz de transmitir el calor desde los conductores de cobre (fuente de calor) al núcleo del estator (disipador de calor). Por eso, el aislamiento a tierra tiene que tener la mínima resistencia a térmica, para prevenir las altas temperaturas en el cobre.

- **Diseño mecánico:** El aislamiento a tierra debe prevenir que el cobre no pueda vibrar libremente, como consecuencia de las fuerzas magnéticas, pues esto que estas vibraciones puede dañar el aislamiento [Stone, 2004].



2.6 Capas de un aislamiento [Stone, 2004]

2.2 Aislamiento ante ondas transitorias

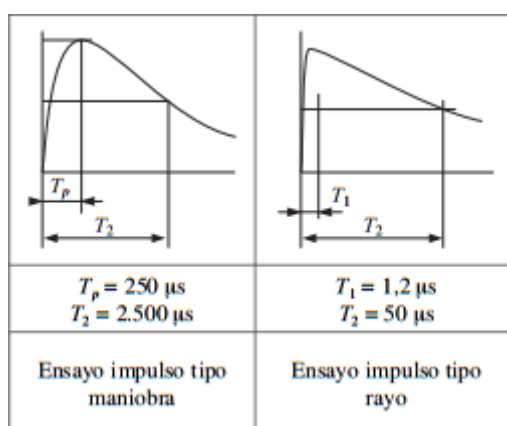
Para prevenir la reducción de la vida de las máquinas eléctricas, provocada por los convertidores electrónicos y otras fuentes de sobretensiones, se realizan ensayos con transitorios de tensión. Estos transitorios de tensión, se pueden aplicar de dos formas diferentes, según el tipo de esfuerzo eléctrico que se quiera aplicar.

2.2.1 Ensayo clásico o convencional

Este ensayo consiste en aplicar impulsos de tensión tipo rayo y maniobra. Si estas magnitudes son elevadas y existen defectos graves en los aislamientos, se producirá la ruptura del dieléctrico. Al producirse esa ruptura, se evita un fallo inesperado del equipo. La detección de esta ruptura se observa mediante una caída anómala de la tensión normalizada aplicada.

Para realizar este ensayo en sistemas trifásicos, conviene aislar las fases de la máquina entre sí y aplicar tensión entre una fase con las otras dos puestas a tierra. También se debe ensayar el aislamiento entre cada fase y tierra. Si no es posible aislar las fases entre sí, se aplicará tensión entre todas las fases y tierra.

Los impulsos tipo rayo y maniobra están normalizados según la norma UNE-EN 60071-1. Los impulsos tipo rayo se pueden aplicar para cualquier equipo, mientras que los impulsos tipo maniobra sólo se utilizarán para mantenimiento/aceptación de equipos de tensión nominal superior a 300 kV. Para aislamiento no autorregenerable (transformadores), se utilizan ensayos de impulsos para tensión soportada nominal, que consisten en aplicar 3 impulsos de tensión de las dos polaridades a cada aislamiento. El equipo supera la prueba cuando no se produce ningún fallo.



2.7 Formas de onda normalizadas [UNE-EN 60071-1, «Coordinación de aislamiento. Parte 1: Definiciones, principios y reglas», 2006.]

En todos los casos, estos ensayos simulan un tipo de esfuerzo eléctrico muy específico: tensiones de magnitudes muy superiores a la nominal, pero esporádicos.

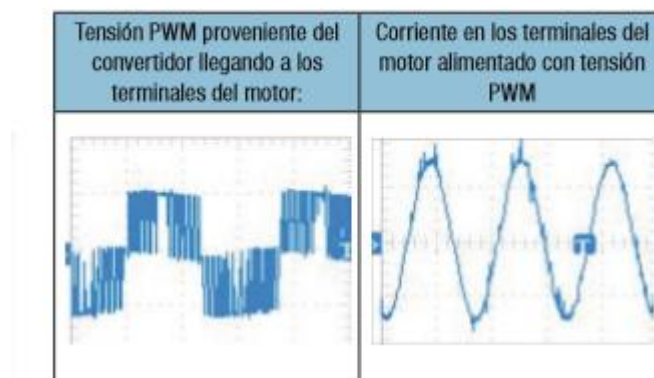
Este ensayo, no proporciona gran información diagnóstica (solo detecta grandes defectos del aislamiento, malas conexiones entre fases y terminales exteriores y faltas graves a tierra), pues es un ensayo pasa-no pasa. En el caso que la repuesta sea positiva, este ensayo garantiza la rigidez dieléctrica del aislamiento a corto plazo, pero en el caso de que se produzca la perforación del aislamiento, el equipo queda fuera de servicio. Cabe resaltar que este tipo de ensayo no se hace para máquinas rotativas [Kuffel, 2000].

2.2.2 Ensayos en máquinas rotativas (*surge test*)

Con la evolución de los semiconductores de potencia, los cuales hacen más eficientes a los motores, posee elevadas frecuencias de conmutación en las llaves electrónicas empleadas en los convertidores actuales (comúnmente llamados transistores IGBT). Estos provocan consecuencias no deseadas; tales como el aumento de la emisión electromagnética y la probable incidencia de picos de tensión, como valores elevados de dV/dt (que es la tasa de variación de la tensión en el tiempo), en los terminales de

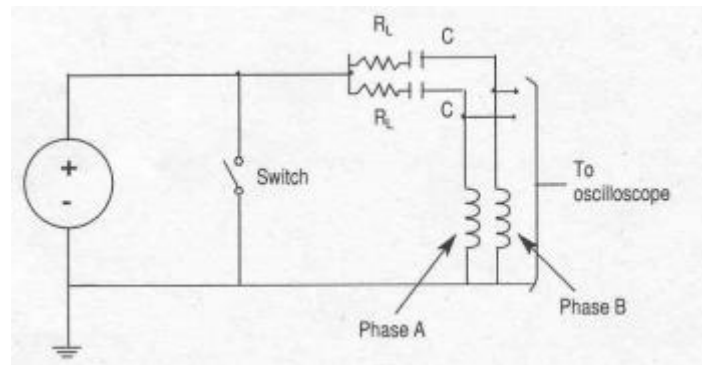
los motores alimentados por convertidores, dependiendo de las características de control como: resistores de *gate*, capacitores, tensiones de comando y de la modulación PWM adoptada. Cuando estos convertidores son utilizados con un motor de inducción de jaula, los pulsos, en combinación con las impedancias del cable y del motor, pueden generar de manera repetitiva, sobretensiones en los terminales del motor. Estos trenes de pulsos pueden reducir la vida del motor degradando el sistema de aislamiento [Guía técnica WEG].

Este ensayo se ensaya en devanados estatóricos aleatorios y preformados con conductores compuestos por múltiples espiras y consiste, en aplicar tensiones transitorias de moderada magnitud con un tiempo de conmutación muy corto. Esto provoca que entre el 80-90% de la tensión aplicada a una fase caiga en la primera bobina del devanado, lo que puede dar lugar a que se produzca, en el caso de devanados aleatorios, una caída de tensión excesiva en el aislamiento espira-espira, que se convierte en el punto más débil del devanado. Un cortocircuito entre espiras anticipa un fallo inminente en el aislamiento bobina-tierra, dejando la máquina inutilizada.



2.8 Forma de onda proveniente del convertidor [Guía técnica de WEG]

El esquema del ensayo consiste en una fuente de tensión continua que alimenta en serie a un circuito RC. Al conectar dicho equipo a una maquina, se convierte en un circuito RCL.



2.9 Esquema RCL (de [Stone, 2004])

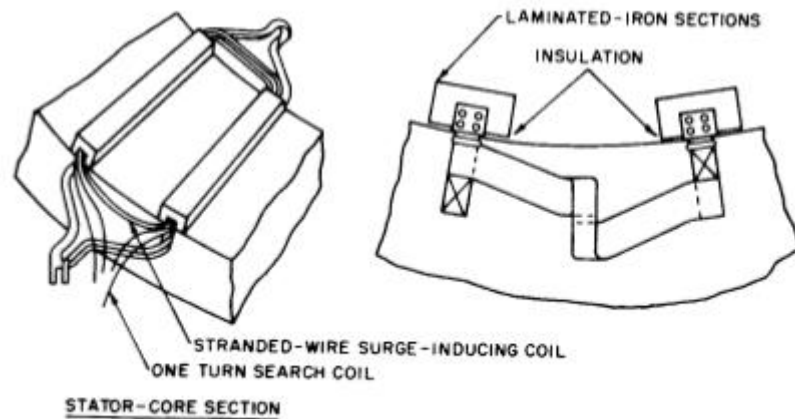
Para realizar el ensayo conviene aislar las fases de la máquina entre sí, aplicando tensión a una fase con las otras dos puestas a tierra. Si no es posible aislar las fases entre sí, se aplicará tensión a dos fases conectadas en serie, realizando este procedimiento en todas las fases. Al no distribuirse de manera homogénea el transitorio de tensión, puesto que en la primera espira de la primera bobina de una determinada fase aparece el mayor valor de tensión (debido a las características inductivas y capacitivas del arrollamiento del motor, en la bobinas subsecuentes se producirá una amortiguamiento de dicho impulso), es conveniente repetir el ensayo cambiando la polaridad, para así, poder detectar si la debilidad se encuentra al principio o al final de la fase.

La detección de un fallo en el aislamiento espira-espira es complicada, pues no produce incrementos inmediatos de la corriente consumida de la fuente. Sin embargo, el cortocircuito entre dos espiras provoca una disminución en la inductancia propia de la bobina. Hay dos formas de detención de fallos:

- Mediante la medición de la frecuencia de resonancia: detecta fallos en el aislamiento espira-espira, puesto que cuando se produce un cortocircuito, la inductancia disminuye y como consecuencia la frecuencia de resonancia aumenta.

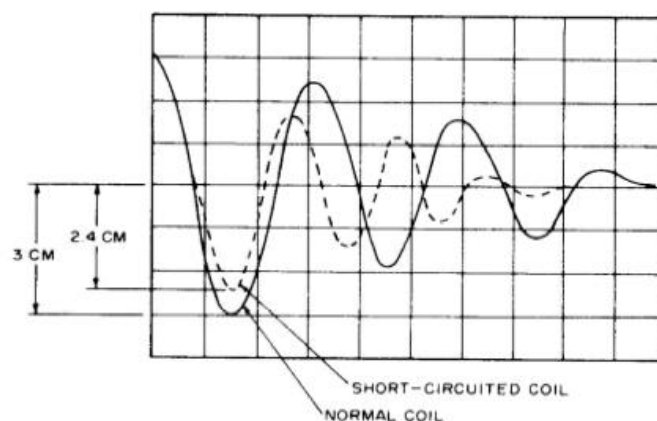
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- Mediante la aplicación de un transitorio sobre una bobina inductora ("*inducing coil*") superpuesta sobre la bobina ensayada en el estator. Otra bobina superpuesta hace de sonda ("*search coil*") detectando el transitorio por medio de un divisor resistivo.



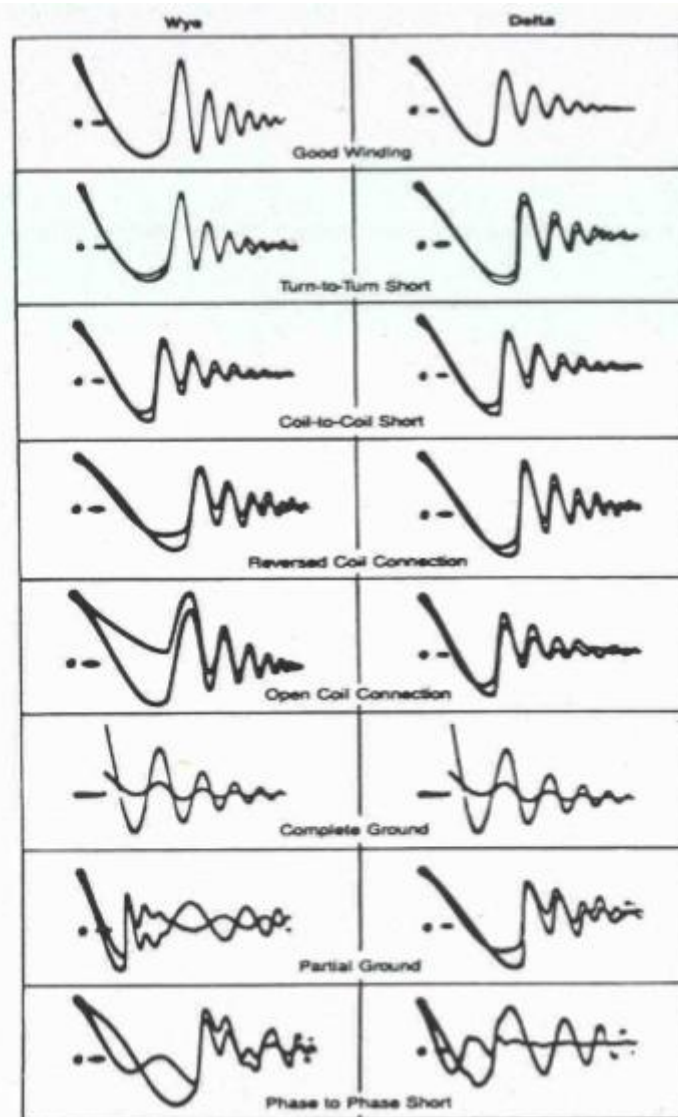
2.10 Ubicación de las espiras inductoras y sonda sobre la bobina ensayada (de [IEEE std 522,1992])

Los ensayos se pueden realizar con tensiones inferiores a la nominal de la máquina y se detectan cortocircuitos entre espiras ya desarrollados en la máquina sin que el ensayo sea potencialmente destructivo, aunque no permite medir la capacidad del aislamiento espira-espira. Además, como se ha dicho anteriormente, los tiempos entre cortocircuitos entre espiras y los cortocircuitos completos fases-tierras son muy cortos. Por estas razones se han extendido más los ensayos potencialmente destructivos. Éstos consisten en realizar varios ensayos a tensión DC del generador de impulso crecientes hasta la tensión final de ensayo. Estos ensayos se comparan utilizando los registradores de impulsos específicos que permiten autoescalar todas las ondas de tensión y superponerlas, ya que si existe una diferencia en la tensión o frecuencia de oscilación de más del 10% indicará que existen cortocircuitos. Este ensayo no proporciona información diagnóstica, pues es un ensayo pasa-no pasa. Si el ensayo es positivo, se garantiza la rigidez dieléctrica del aislamiento espira-espira a corto plazo, pero si no pasa el ensayo y se produce perforación del aislamiento espira-espira quedando la máquina fuera de servicio hasta que se sustituya la bobina dañada.



2.11 Superposición de sobretensiones. [De IEEE std 522,1992]

Según la forma de la superposición de las ondas de tensiones, se puede conocer cuál es el fallo.



2.12 Interpretación de las oscilaciones de tensión.

Al realizar el ensayo hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Antes de realizar el ensayo conviene realizar el ensayo de resistencia e índice de polarización.
- El ensayo potencialmente destructivo puede producir un leve envejecimiento. Mientras que el ensayo a baja tensión no produce envejecimiento alguno.
- Si se compara solamente oscilaciones amortiguadas entre fases, la presencia de un cortocircuito en cada fase puede que no se detecte y una diferencia en la inductancia propia de una fase puede provocar falsas alarmas. Por ello, la medida previa de resistencia del devanado es muy importante.

- La instrumentación necesaria, debe ser lo suficientemente sensible como para detectar cambios en la frecuencia de oscilación, que muchas veces no supera el 1%.
- En generadores síncronos de polos salientes, el rotor debe ser extraído para el ensayo.

Siguiendo la normativa [IEEE Std 522, 1992] los tiempos de conmutación de las tensiones transitorias son de unos 100 ns y las magnitudes de tensión son $3.5 \cdot E^2$, para el ensayo de aceptación (verifican en motores nuevos o rebobinados), $2.6 \cdot E$ para ensayo de mantenimiento (verifican en motores en servicio) y según la normativa NEMA MG1 $3.7 \cdot E$ para la prueba de aceptación de los motores accionados con inversores PWM.

2.3 Surge test

Muchas máquinas eléctricas de corriente alterna están diseñadas para tener multitud de espiras en el devanado ordenado. En estos casos, el devanado tiene dos barreras aislantes separadas, pero relacionadas entre sí:

1. Aislamiento entre espiras.
2. Aislamiento a tierra.

El fallo en algunos de los dos aislamientos terminará acortando la vida útil de la máquina. Para prevenir estos fallos, esta norma sugiere métodos y ensayos de nivel en los aislamientos.

La experiencia ha demostrado que los fallos de aislamiento entre espiras, pueden estar provocados por impulsos anormales de sobretensiones producidas por: caídas de rayos, cierre defectuosos de los interruptores o el mal funcionamiento de diversos los dispositivos de conmutación. También pueden ser causado, por impulsos transitorios de tensiones durante el funcionamiento normal del interruptor, dichos impulsos tienen un tiempo de subida ("rise-time") que dura un de 1 a 5 microsegundos. Con el fin de evitar estos fallos, se pueden instalar pararrayos o condensadores de onda en los terminales de la máquina. También, mediante el aumento del aislamiento entre espiras, se consigue que el tiempo del impulso se incremente hasta $5\mu s$ o más.

2.3.1 Campo de aplicación

Esta norma recomienda realizar las pruebas de resistencia del aislamiento en las diferentes espiras antes de hacer el ensayo de aislamiento. El rango de potencia de las máquinas a ensayar, comprende entre 200 KW y 100 M. Estas recomendaciones se aplican a:

$$^2 E = \sqrt{2} \cdot U_n / \sqrt{3}$$

- Bobina individual del estator después de la fabricación.
- Bobina insertadas en estatores nuevos.
- Bobinas y bobinados para el rebobinado de máquina usada.
- Bobinados de máquinas en servicio, para determinar su aptitud para servicios futuros (Prueba preventiva de mantenimiento).

2.3.2 Condiciones de servicio

La diferencia de tensión máxima de operación (a frecuencia de red) entre las vueltas en una bobina depende de la tensión entre los terminales de la bobina y la construcción interna de la bobina.

Una diferencia menos predecible de voltaje entre espiras, puede ser causada por transistores, debido a la formación de arco en el circuito que puede ser perjudicial para el aislamiento.

La diferencia de voltaje que debe soportar el aislamiento entre espiras, comprende desde menos de 100 V para el funcionamiento normal (solo se necesitaría separación física) hasta varios miles de voltios bajo condiciones transitorias (es necesario tener unas considerables resistencia dieléctrica).

2.3.3 Dispositivos sugeridos para el ensayo

Un dispositivo de prueba adecuado, debe proporcionar un control de tensión con una indicación precisa del nivel de tensión y poder detectar fallos en el aislamiento espira-espira. Este dispositivo, tiene que ser capaz de producir una onda con un franco de subida para aplicársela a la bobina de prueba. Su funcionamiento lleva la siguiente secuencia: un condensador se carga a una tensión apropiada y posteriormente se descarga mediante un interruptor en un circuito que incluye la bobina de prueba. Entonces la tensión y la corriente oscilan a la frecuencia natural del circuito.

En los dispositivos de tipo conductivo, la prueba de tensión se aplica directamente en los cables de la bobina. La detección de fallos es por inspección visual en un osciloscopio de rayos catódicos. Las bobinas pueden ser probadas individualmente o si son similares, simultáneamente. En la prueba de una sola bobina, se aplica una forma de onda suficientemente baja que posteriormente, se utilizará como modelo ensayos con mayor tensión. Una diferencia aproximadamente del 10% o más, indicará un fallo probable en el aislamiento.

En los dispositivos de tipo inducción, la tensión de prueba se induce en la bobina de ensayo, que constituye el secundario del "transformador" creado, mientras que su primario es excitado por un frente de onda del condensador. El fallo está indicado por la asimetría de la tensión o intensidad en sus terminales (ver figura 2.10).

2.3.4 Secuencia de ensayo

Las bobinas pueden ser probadas una o más veces en las siguientes etapas de fabricación:

- Antes de la inserción en el núcleo del estator. Esto es apropiado cuando las bobinas se van a instalar en una ubicación remota de la planta de fabricación de bobinas. Si las bobinas tienen una impedancia demasiado baja en el aire, pueden ser ensamblados en un núcleo simulado para probarlas. Todas las bobinas deben ser probada.
- Después del montaje en el núcleo del estator y del acuanamiento de la bobina, pero antes de conectar las conexiones en serie y conectar entre la fases.
- Después de conectar en fase, pero antes aislar las conexiones en serie y antes conectar entre las fases.
- Después de que todas las conexiones estén hechas y se aplique el aislamiento. Todas las pruebas de mantenimiento se realizan con normalidad en esas condiciones. Si se aplica la prueba de tensión en los bornes de la máquina, el nivel de tensión de impulso eléctrico debe seleccionarse con el fin de evitar esfuerzos excesivos en el aislamiento a tierra. En este caso, la prueba puede revelar cortocircuitos existentes y no debilitar el aislamiento entre espiras. En caso contrario la prueba de tensión puede ser realizada en la bobina del estator por medio de una bobina de inducción de aumento.
- En bobinas adicionales (si se especifica en el acuerdo entre el fabricante y el usuario) que no se utilizan en el arrollamiento de la máquina, para determinar la capacidad de destrucción del aislamiento espira-espira del diseño del sistema de aislamiento eléctrico.

Las condiciones ambientales deben ser aceptables para las pruebas de aislamiento y la superficie de aislamiento debe estar limpia y seca. La temperatura de la bobina debe estar al menos a unos pocos grados por encima del punto de rocío como mínimo, para evitar la condensación de humedad en el aislamiento de la bobina.

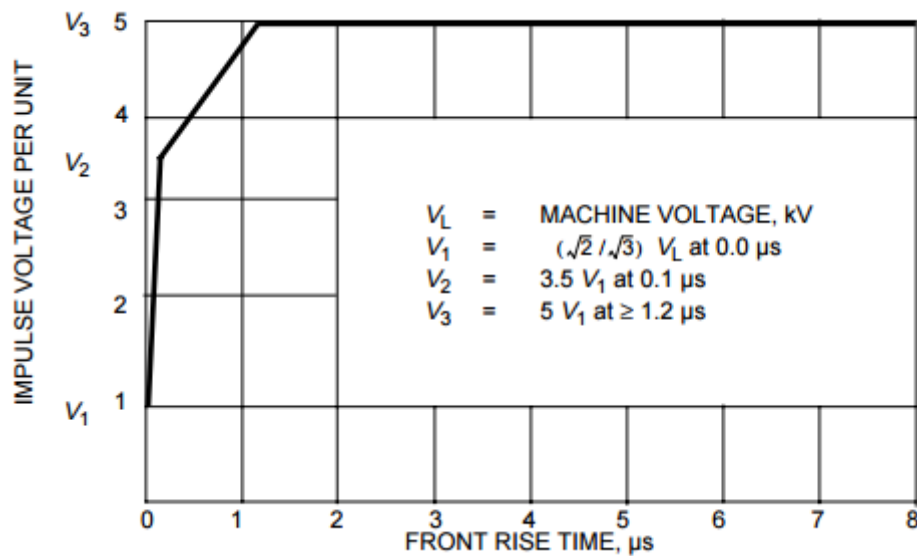
2.3.5 Niveles de tensión del ensayo para bobinas nuevas

La tensión mínima del ensayo espira-espira no debe ser inferior a 350 V, que es la tensión mínima para que haya una descarga en campo uniforme en el aire (Ley de Paschen).

Los fabricantes han utilizado la bobina y los parámetros de la máquina como, el tamaño y el peso de la bobina, la longitud de la espira, la disposición de vuelta en las bobinas, los voltios de operación por espira o bobina, el sistema de tensiones, la capacidad entre espiras y tierra... Entre otros para determinar los niveles de voltajes para sus productos. Estos procedimientos no se han descrito explícitamente en la literatura, ya que se tiene que llegar a un acuerdo entre el fabricante y el usuario en la

técnica del ensayo y el nivel que se debe aplicar a las bobinas de la máquina y en qué etapa de la fabricación se deben ejecutar los ensayos.

Cualquier técnica de ensayo utilizada para probar el aislamiento tiene que ser capaz de producir impulso con un frente de subida de $0.1 \mu s$ (una tolerancia de $0.1 \mu s$). En general, las bobinas deben tener suficiente resistencia a tierra y aislamiento entre espiras para resistir la tensión de impulso definida en la figura 2.12



2.13 Impulso eléctrico para la resistencia del aislamiento

$$V_1 = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right) V_L = 1 \text{ pu con un Rise time } 0.0 \mu s$$

$$V_2 = 3.5 \text{ pu con un rise time } 0.1 \mu s$$

$$V_3 = 5 \text{ pu con un rise time } \geq 1.2 \mu s$$

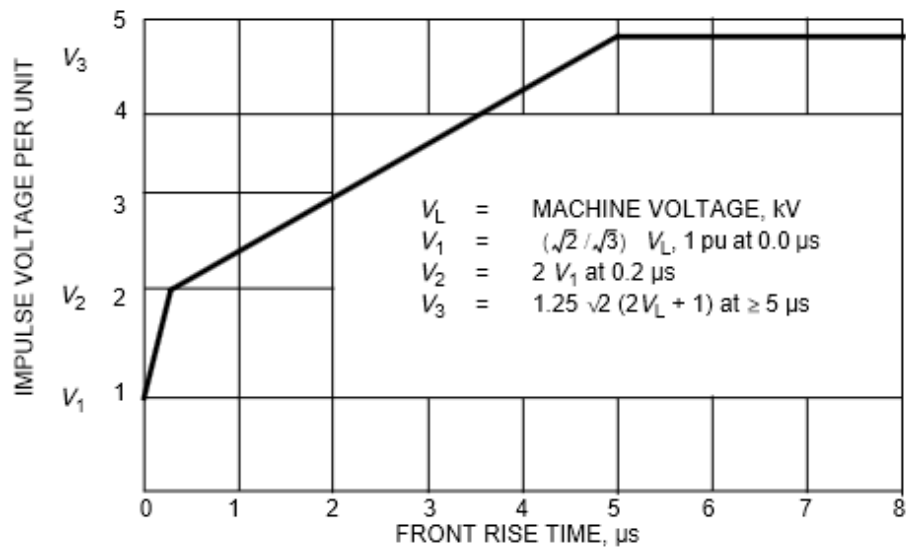
Donde:

$V_n (n = 1, 2, 3)$ = Capacidad del pico del impulso electrico a traves de la bobina

V_L = tensión de linea nominal en kV

En el caso de que sea probable que la máquina sea esté sometida a sobretensiones durante su vida de servicio, aumentando el aislamiento por encima de la rigidez dieléctrica nominal de las bobinas. En este caso, el ensayo de voltaje espira-espira puede ajustarse de una manera apropiada, sin peligro de dañar la bobina.

Si hay un acuerdo entre el fabricante y el usuario, además si las máquinas a ensayar no son propensas a tener gran magnitud de sobretensiones de frente rápido, se puede utilizar la figura 2.13 en vez de la figura 2.12



2.14 Alternativa del impulso eléctrico para la resistencia del aislamiento

Para bobinas no impregnadas, la tensión de ensayo puede estar entre un 60-80% del valor especificado en la figuras 2.12 y 2.13, según lo acordado entre el fabricante y el usuario.

2.3.6 Ensayos de mantenimiento o ensayos de máquinas en servicio

La tensión de impulso sugerida para este tipo de pruebas, es del 75% de la definida en la sección anterior. Es una buena práctica para obtener la aprobación por parte del fabricante de las bobinas en cualquier programa de prueba.

En muchos casos, particularmente, en las pruebas de mantenimiento, es deseable hacer la prueba con un mínimo de desmontaje de la máquina. En máquinas síncronas de polos salientes, esto se puede hacer extrayendo un polo junto con su montaje completo de devanado de campo. Para las máquinas de polos no salientes, el rotor puede tener que ser extraído.

El ensayo puede realizarse usando una bobina de inducción para aplicar la tensión de prueba a la bobina. El grado de acoplamiento que se puede alcanzar utilizando este método, varía ampliamente, y en algunos casos puede que no sea posible alcanzar el nivel de tensión de 75% en las bobinas probadas. Por tanto, 75% debe considerarse como una directriz general.

2.3.7 Procedimiento de ensayo y métodos

2.3.7.1 Método para la aplicación de impulso de tensión para completar bobinados

Para medir la forma de onda de tensión, se utiliza una bobina de búsqueda colocada cerca del hierro del estator, para observar esta forma de onda se utiliza un osciloscopio con un divisor de tensión resistivo.

Con una muestra de ambas bobinas, bobinas en cortocircuito y bobinas normales, se obtiene la forma de onda en el devanado. Cuando la bobina de búsqueda se ve afectada, se producirá una reducción del flujo en las bobinas cortocircuitadas. Una bobina cortocircuitada, que muestra una reducción de amplitud de la onda del orden de un 20%, cuando se compara con la bobina normal. Otro de los efectos que se produce cuando hay un cortocircuito, es el aumento de la frecuencia, aunque este aumento es demasiado leve como para utilizarlo como criterio de prueba.

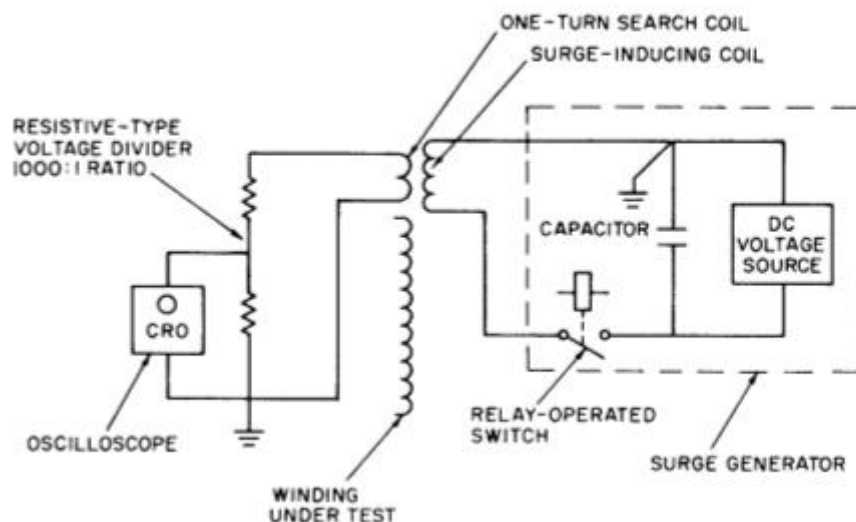
Se recomienda que la bobina de inducción y la bobina de búsqueda estén aisladas de tierra para lo suficiente para soportar el máximo voltaje que pueda aparecer en cada bobina. Será necesario retirar el rotor de la máquina o para máquinas de polos salientes un polo del rotor, para proporcionar espacio.

El circuito de prueba consiste principalmente en una bobina, un condensador y una pequeña resistencia. A partir de estos elementos, se puede calcular la frecuencia de oscilación a partir de la siguiente fórmula:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

Pero cuando el segundo término de la raíz es muy pequeño, la fórmula se puede simplificar a:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



2.15 Circuito del ensayo

2.3.7.2 Procedimiento de ensayo para máquinas dañadas

El esquema del circuito es el mostrado en la figura 2.14, asegurándose de conectar todas las tierras incluyendo la carcasa, pero no conecte a tierra los arrollamientos a ensayar y considérellos como si estuvieran energizados durante toda la prueba.

La sección del hierro laminado debe estar aislada desde el núcleo de la máquina, y ser probado con un material aislante delgado, como cinta adhesiva de espesor 0.25 mm que debe estar ajustado firmemente en la base de la máquina. Conecte los cables del divisor de tensión al estator de la bobina para la calibración. Aplicar una pequeña tensión (1000 V) a la bobina de inducción de aumento y observar la onda de tensión inducida en la bobina del estator (esto debe ser de aproximadamente 75% de los voltios aplicados a la bobina de inducción de aumento). Cuando se establece una forma de onda adecuada, aumentar la tensión para obtener el primer pico de amplitud equivalente al voltaje deseado del ensayo. Este deberá ser como mínimo de 350 V por vueltas con un pico máximo del 75% de la bobina ensayada como se especifica en la sección 2.3.5

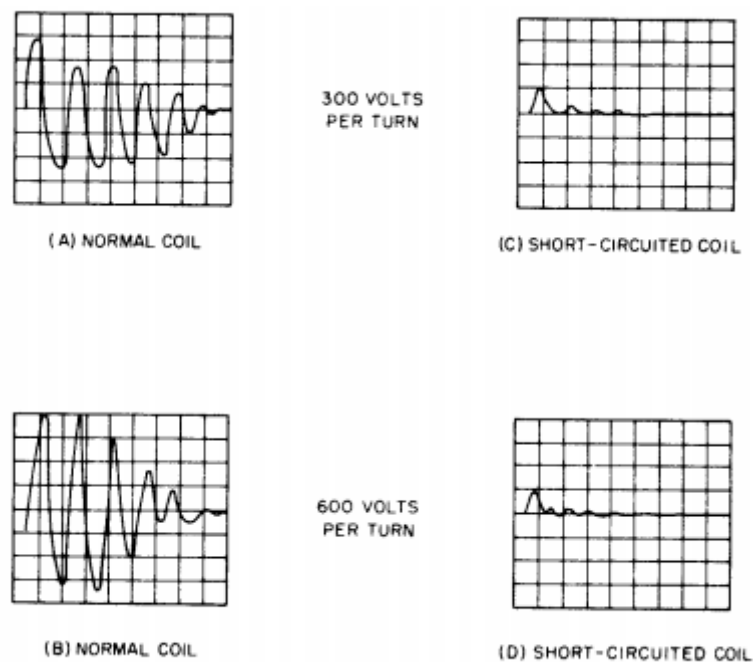
Para determinar el efecto que produce un cortocircuito en una espira, se debe aplicar deliberadamente un cortocircuito a través de los cables conectados a la bobina del estator y aplicar el mismo nivel de tensión utilizado para obtener la carga deseada en voltios por vueltas. Esto establecerá los criterios para la prueba de las bobinas restantes y las formas de ondas de las bobinas en cortocircuitos y normales, que deben ser proporcionales a los mostrados en la figura 2.10. Proceda a probar el devanado moviendo la sección del hierro laminado secuencialmente de manera que se coloca sobre cada una de las bobinas en la máquina. A continuación registre la configuración del osciloscopio, el nivel de tensión aplicado a la bobina de inducción de aumento y la amplitud del primer pico de la onda de tensión observada en el osciloscopio, identificar los picos de cada bobina que se prueba. Desde la forma de onda observada en la pantalla del osciloscopio para cualquiera de las condiciones, por lo general se puede determinar con más precisión por barridos repetitivos, realice al menos tres descargas al estabilizar la forma de onda. La precisión de este ensayo en una bobina cortocircuitada puede determinarse mediante la conexión de los cables de la bobina del estator encontrando cortocircuitos y repitiendo el ensayo aplicando deliberadamente cortocircuitos a través de los cables. No debe haber ningún cambio significativo respecto a la forma de onda obtenida durante la prueba anterior.

2.3.7.3 Procedimiento de ensayo para bobina durante el bobinado

Este ensayo se puede aplicar en un conjunto de nuevas bobinas, completamente ensambladas en las ranuras y con las cuñas en su lugar, mediante la aplicación directa del impulso eléctrico en el estator antes de aislar las conexiones.

En esta disposición, los cables del divisor de tensión están conectados en paralelo con el generador de impulso. El efecto de un cortocircuito en una espira, bajo este ensayo será con se indica en la figura 2.15. La calibración de la forma de onda de la tensión se realiza como se describió anteriormente y el pico de tensión se registra por el valor más alto, al aplicar tensiones al 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, y 1 pu del pico de la tensión de ensayo. Para cada nivel de tensión se debe aplicar tres impulsos.

Con la técnica de ensayo aplicada directamente, una bobina del estator en cortocircuito proporcionará una respuesta plana (Figura 2.15) para la tensión aplicada y, por lo tanto, las tensiones de paso, son el nivel de tensión en la que un cortocircuito se puede desarrollar en el estator de la bobina.



2.16 Forma de onda de cortocircuitos y ensayo normal de bobina conectado en el hierro

3 Montaje experimental

3.1 Introducción del equipo de generación de transitorios MTC2

3.1.1 Campo de aplicación del equipo MTC2

El equipo está previsto exclusivamente para el ensayo de las bobinas del estator de un motor sin tensión nominal aplicada. Los niveles de tensión para cada prueba los determinará la norma correspondiente, teniendo en cuenta que este modelo sólo es capaz de entregar 15 KV.

Las medidas de seguridad utilizadas en el equipo de generación de transitorios MTC2 se describen en el anexo 1.

3.1.2 Descripción del equipo MTC2

El equipo posee un ordenador con un sistema operativo Windows XP incorporado. Las características del equipo interno son:

- Procesador Intel Celeron 800 MHz
- Memoria RAM: 512 MB
- Disco Duro: 110 GB



3.1 Equipo MTC2

Hay varias maneras de utilizar el equipo MTC2. En este caso, se empleó un ratón y un teclado, los cuales van conectados al equipo mediante un adaptador Bluetooth a través de uno de los dos puertos USB disponibles. En el otro puerto USB (3) puede



conectarse una memoria Flash USB de 512 Mb disponible también para el equipo. La otra alternativa para utilizar el equipo es mediante las tres ruletas (4), que se pueden observar en la parte superior derecha de la imagen, y mediante el uso de la pantalla táctil (5).

En la parte izquierda del frontal del equipo se ve un pulsador (6), de color rojo, que actúa en paralelo con el pulsador de pie. Es un sistema de seguridad, el cual no permite la salida de alta tensión, a no ser que sea pulsado. Basta con utilizar unos de ellos para llevar a cabo los ensayos. En nuestro caso se utiliza el pulsador de pie por su mayor comodidad.

Debajo del pulsador citado anteriormente, hay una entrada para conectar una sonda de obtención de la temperatura ambiente (7), útil para evaluar ciertos valores de variables durante los ensayos. En nuestro caso, como no se medirá resistencia de aislamiento, esta medida de temperatura no es necesaria.

En la parte derecha del frontal hay una llave (1), sin la cual el equipo no funcionaría. Debajo de esta llave hay un indicador de color rojo (2), que se encenderá en caso de haber alta tensión en los terminales del equipo, lo que sirve como sistema de seguridad, como un indicador del peligro.

El resto de los conectores (8) presentes en el frontal, se emplean para conectar periféricos (una pantalla, un teclado, un cable de red, etc.). El conector RS232 (9) sirve para conectar un comprobador de alta tensión, que tiene su propia instrucción técnica, el GPL-1.

3.1.1.1 La puesta en marcha del equipo

El equipo ofrece una gran flexibilidad a la hora de realizar las conexiones al estator del motor o a los devanados del transformador que se vayan a medir. Esto es debido a que el software permite programar qué pinzas deberán ser las encargadas de suministrar la tensión, de ondas de choque, etc.

En el momento de realizar las conexiones, se crea una situación de riesgo debida a la manipulación de las conexiones. Se debe prestar especial atención a que no haya tensión en los terminales.

La secuencia básica del encendido y la conexión del equipo es:

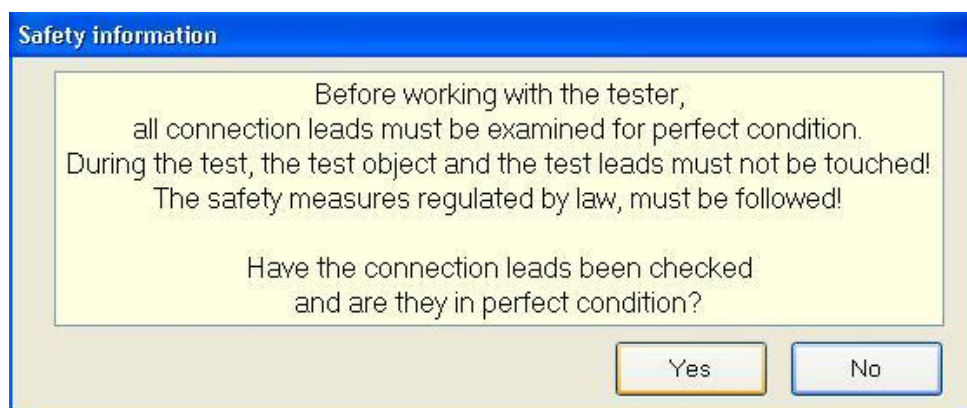
1. Conectar el cable de alimentación (AC 220V).
2. Conectar el teclado, el ratón, además comprobar que el adaptador *Bluetooth* está conectado, y también la memoria *Flash USB*.
3. Encender el equipo con la llave.
4. Conectar el interruptor de seguridad de pie a la clavija del frontal del equipo.
5. Revisar que no hay tensión aplicada.

6. Realizar las conexiones entre el devanado que se va probar y las pinzas kelvin, y asegurarse de que la pinza de tierra esté conectada.
7. Realizar el ensayo, teniendo siempre presentes las medidas de seguridad.

3.1.1.2 Software

El software de medida está directamente instalado en el disco duro del equipo. Este posee un acceso directo en el escritorio llamado *Schleich MTC2*. Al iniciar el equipo el software se ejecuta automáticamente, aunque se puede cerrar normalmente para poder utilizar el sistema Windows XP instalado.

Una vez iniciado el programa, lo primero que aparece es un mensaje de seguridad donde recuerda las medidas básicas que se deben tener en cuenta mientras se realiza el ensayo:



3.2 Advertencia de seguridad

Una vez revisados los aspectos destacados en la advertencia, se puede comenzar a utilizar el programa de ensayos.

Los ensayos que realiza el equipo son: ensayo de resistencia, ensayos de impulso y ensayos de aislamiento.

Modos de utilización del programa:

-Modo automático y semiautomático: hay una serie de pasos prefijados para realizar el ensayo, es decir, se realizarán los tres ensayos: el ensayo de resistencia, el ensayo de impulso y el ensayo de aislamiento. La diferencia entre ellos, es que en el modo semiautomático se debe iniciar cada paso mediante una orden del operador. En modo automático todos los pasos se realizan uno tras otro, sin detenerse hasta la finalización del ensayo.

-Modo manual. Este es el modo que utilizaremos para realizar el ensayo por su facilidad de utilización y porque se puede elegir el ensayo que se desea realizar sin que se tenga que realizar los otros dos ensayos, ya que la secuencia del ensayo se va realizando bajo un estricto control del operario.

Una vez seleccionado el modo manual aparecerá la siguiente pantalla:



3.3 Pantalla inicial

Lo primero que se debe hacer para efectuar un ensayo en este modo, es seleccionar la tipología de las conexiones (1) mediante los botones de arriba a la izquierda. Los números representan las pinzas y su conexión en los devanados. En nuestro caso, los botones que utilizaremos son:



-Devanado de baja del
transformador
-Motores asíncronos



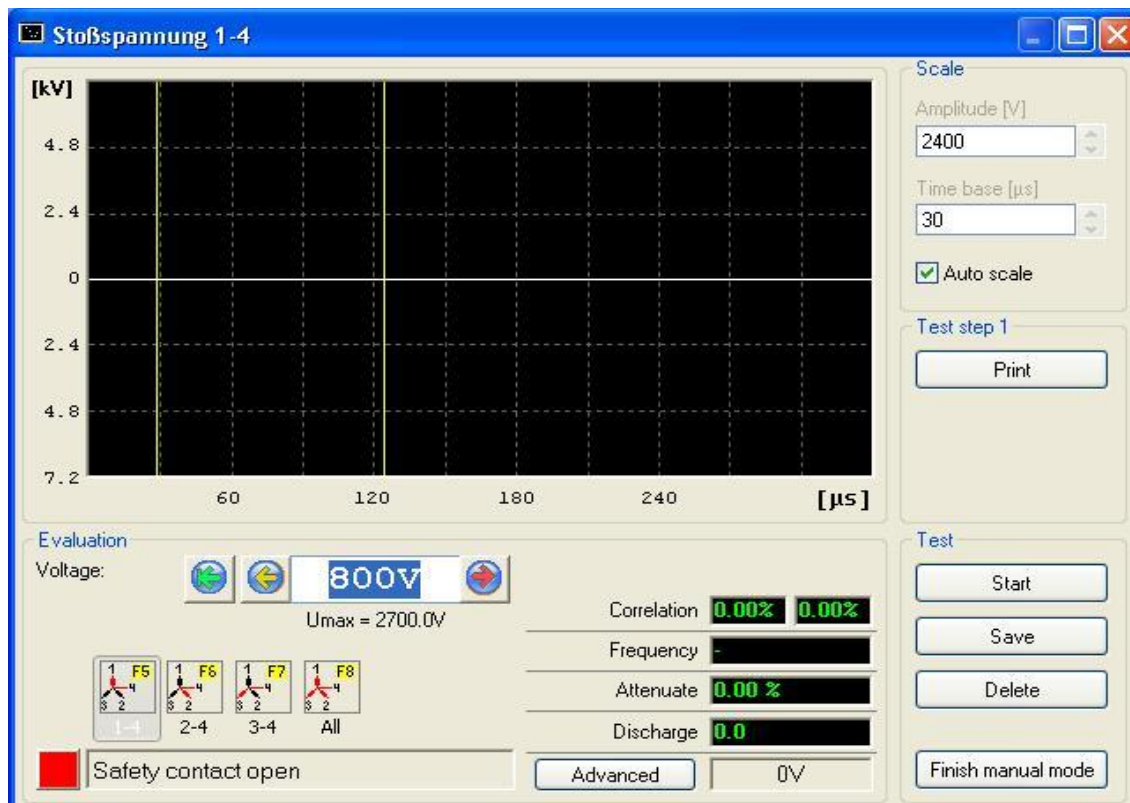
Devanado de alta del
transformador

3.4 Botones tipo de conexión

A continuación se deberá elegir la tensión nominal del motor (2), entre las opciones que aparecerán en el menú superior. Este valor se utiliza para conocer la tensión necesaria y para realizar el ensayo de resistencia. Los ensayos se realizan pulsando en el botón correspondiente a cada uno de ellos (3). El ensayo de resistencia de devanado comienza automáticamente (son ensayos de baja tensión), pero los ensayos de

impulso y resistencia de aislamiento requieren que el operario introduzca el valor de tensión, que se aplicará al objeto de ensayo.

Nosotros utilizaremos el ensayo de impulso, el cual permite aplicar en cada uno de los devanados del motor, individualmente, la onda de choque y también una comparación entre los tres aplicando secuencialmente un transitorio a cada fase. Para ello, se selecciona la tensión de pico (800 voltios de valor mínimo, y 15 kV de valor máximo), se selecciona la bobina a ensayar y se activa la casilla *Auto scale*.

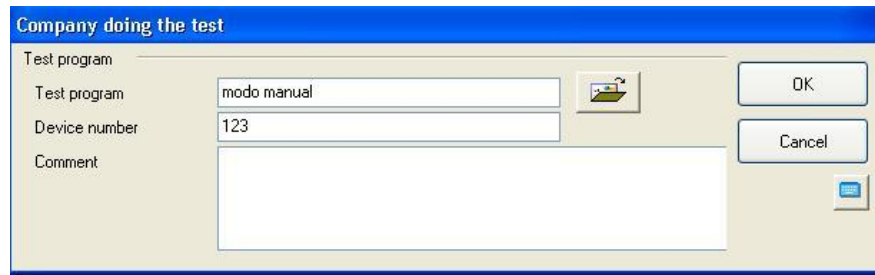


3.5 Surge test 1-4

Una vez pulsado el interruptor de seguridad, comienza el ensayo y finalizará una vez que se deje de pulsar el interruptor (se deja de pulsar cuando se haya obtenido el transitorio en el oscilograma). Posteriormente, se sigue con el ensayo de las demás fases, y finalmente se hará el ensayo secuencial de las 3 fases (permitirá comparar en un único oscilograma los 3 transitorios) el botón *All*.

Cuando se han obtenido las cuatro gráficas (una por bobina y otra comparativa de las 3 fases) se pulsa sobre *Finish manual mode* y finalizará el ensayo de impulso.

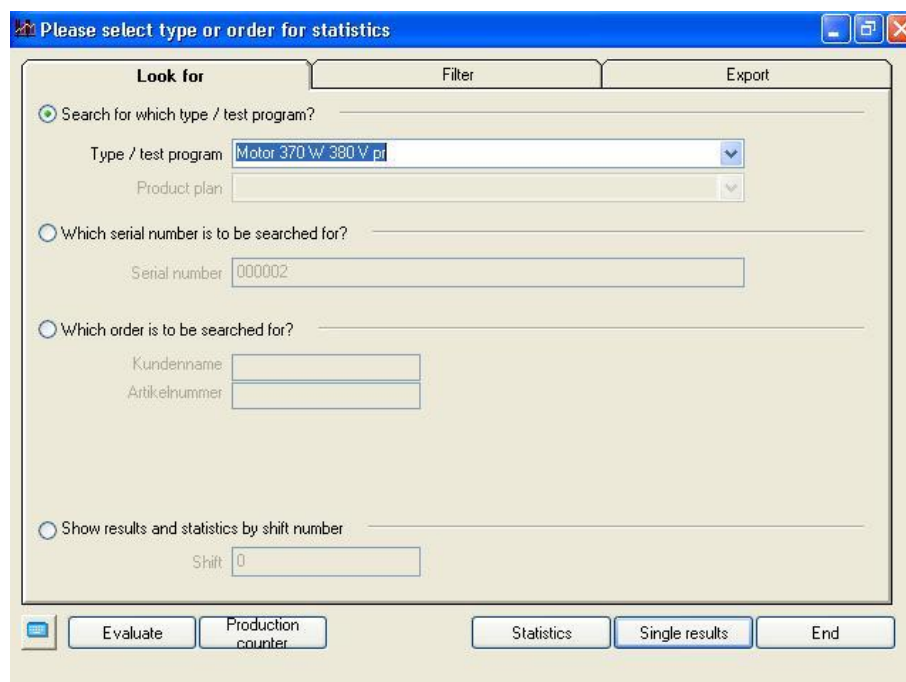
Una vez realizado el ensayo, se pulsa sobre el botón *Save*, y se asigna un nombre al ensayo. Posteriormente se pueden recuperar los datos para realizar un informe.



3.6 Guardar el ensayo

La creación de los informes se realizará de manera automática con los datos que han sido tomados y guardados. Aunque estos informes tienen un carácter comercial, lo cual, no es válido para incluirlo en un TFG, pero si emplearemos estos informes para comparar con las capturas en el osciloscopio.

Para crear un informe de resultados de un ensayo, pinchar sobre el botón *Results and Statistics* de la barra superior de la pantalla principal una vez se hayan cargado los datos del ensayo. Como resultado aparecerá una pantalla como la siguiente:



3.7 Pantalla de creación de informes

A continuación, se debe seleccionar el programa de ensayos en el que se hayan guardado los resultados de una prueba y pulsar sobre el botón *Single results*. La pantalla que aparece es:

Single results									
Type / test program motor siemens 15KW 380V					Fixture: 1				
Test step	Method	Set value	+Tol.(%)	-Tol.(%)	Actual value	Go	Date	Time	Un ▲
resistencia 1-4	R_W	0,2350000	0,258500	0,21150	0,2317400	Y	28/02/2008	13:55:57	0h
resistencia 2-4	R_W	0,2350000	0,258500	0,21150	0,2315500	Y	28/02/2008	13:55:57	0h
resistencia 3-4	R_W	0,2350000	0,258500	0,21150	0,2331100	Y	28/02/2008	13:55:57	0h
desviacion resistencia	R_W	10,000000	10,00000	0,00000	0,6755500	Y	28/02/2008	13:55:57	%
onda de choque 1-4, Correlation	SSp	10,000000	10,00000	0,00000	0,0789800	Y	28/02/2008	13:55:57	%
onda de choque 1-4, Correlation	SSp	10,000000	10,00000	0,00000	0,3527300	Y	28/02/2008	13:55:57	%
onda de choque 1-4, Attenuate	SSp	10,000000	10,00000	0,00000	2,9419300	Y	28/02/2008	13:55:57	%
onda de choque 1-4, Discharge	SSp	100,00000	100,0000	0,00000	1,5800000	Y	28/02/2008	13:55:57	%
onda de choque 2-4, Correlation	SSp	10,000000	10,00000	0,00000	0,1079600	Y	28/02/2008	13:55:57	%
onda de choque 2-4, Correlation	SSp	10,000000	10,00000	0,00000	0,4034700	Y	28/02/2008	13:55:57	%
onda de choque 2-4, Attenuate	SSp	10,000000	10,00000	0,00000	3,1033800	Y	28/02/2008	13:55:57	%
onda de choque 2-4, Discharge	SSp	100,00000	100,0000	0,00000	2,7300000	Y	28/02/2008	13:55:57	%
onda de choque 3-4, Correlation	SSp	10,000000	10,00000	0,00000	0,0000000	Y	28/02/2008	13:55:57	%
onda de choque 3-4, Correlation	SSp	10,000000	10,00000	0,00000	0,8642100	Y	28/02/2008	13:55:57	%
onda de choque 3-4, Attenuate	SSp	10,000000	10,00000	0,00000	3,5728400	Y	28/02/2008	13:55:57	%
onda de choque 3-4, Discharge	SSp	100,00000	100,0000	0,00000	1,6500000	Y	28/02/2008	13:55:57	%
comparacion ondas de choque, I	SSp	10,000000	10,00000	0,00000	0,0933200	Y	28/02/2008	13:55:57	%
comparacion ondas de choque, I	SSp	10,000000	10,00000	0,00000	1,2326800	Y	28/02/2008	13:55:57	%
comparacion ondas de choque, I	SSp	4,0000000	4,000000	0,00000	2,6299100	Y	28/02/2008	13:55:57	%
<div> <div>No.: 75 S.No.: 000015 Total: 75 Number go: 10 Number n.go: 65</div> <div> <div>< ></div> <div>Detail Print Statistics End</div> </div> </div>									

3.8 Pantalla de resultados individuales de cada ensayo.

En ella podemos ver los resultados individuales de cada ensayo. Moviendo la barra inferior izquierda pasamos de un ensayo a otro, entre todos aquellos que se hayan realizado con el mismo programa de ensayos. Si queremos ver los resultados del último ensayo, debemos desplazar la barra hasta el final. Para crear el informe pulsamos sobre *Print*, y en la pantalla siguiente seleccionamos *Test report formular* y pulsamos sobre *PDF Export*. A continuación se creará un fichero PDF con los resultados del ensayo.

Which print form should be used?

Test report selection

☐ Statistic formular of individual test result
 ☒ Test report formular
 ☐ Print/export all test results (min. 75 pages)

OK

Preview

PDF export

Cancel

3.9 Imprimir el informe.

A continuación se creará un fichero PDF con los resultados del ensayo [LINEALT].

3.2 Instrumentación y conexiones

Para la realización de los distintos ensayos realizados, se ha utilizado una gran variedad de instrumentos y máquinas, en la que su esquema general de la conexión sería osciloscopio, junto con el generador de impulso (MTC2) y la máquina a ensayar. A continuación se hará una descripción de todos los elementos y los distintos mecanismos utilizados.

-Osciloscopio

El osciloscopio, se utiliza para realizar las medidas con gran exactitud de cada ensayo realizado, ya que ésta es capaz de visualizar las señales eléctricas en función del tiempo y así poder realizar un estudio exhaustivo de cada onda, medida en los distintos ensayos.

El osciloscopio que se ha utilizado es de la marca Lecroy, (modelo Wavepro 950) y aunque es un poco anticuado porque el modo de extracción de estos datos, se realiza mediante un disquete, que al disponer de poco espacio de memoria (aproximadamente 1.5 MB) requiere de varias extracciones de información a un PC para grabar pocos ficheros. El osciloscopio tiene numerosas ventajas, como por ejemplo ser capaz de generar un documento con todos los datos de las mediciones (magnitud de las tensiones frente al tiempo registrado) y también de extraer fácilmente una captura de imagen; además, es compatible con sondas de alta tensión que automáticamente registran las señales reales (no atenuadas).

Para poder realizar las mediciones, el osciloscopio tiene una sonda que se conecta a una de las entradas del canal. Hay que elegir la sonda adecuada, ya que si se escoge una sonda de nivel de aislamiento muy superior a la que tiene la máquina, en la medición se perderá exactitud mientras si se escoge una sonda inferior al nivel de aislamiento se podría romper. En nuestro caso para todas las mediciones se utilizó una sonda de 20kV.

Otro elemento que posee, situado en la parte frontal superior derecha es una disquetera, la cual vamos a utilizar para exportar los datos e imágenes de cada forma de onda realizada en los distintos ensayos y así poder trabajar con esos datos en un ordenador convencional.



3.10 Osciloscopio LeCroy

Las características técnicas son:

Max. tensión por canal	50Ω:5Vrms 1MΩ:100Vmax (Peak AC≤5kHz+DC)
Impedancia de entrada	50Ω±1.5% 10MΩ//11pf typical
Frecuencia del muestreo	CH1: 16 GS/s
	CH2: 8 GS/s
	CH3,CH4: 4GS/S
Ancho de banda	1 GHz
Bits	11

Tabla 1 Característica del osciloscopio

- Generador de impulso (MTC2)

Como ya se ha comentado anteriormente, este instrumento se encargará de producir un impulso eléctrico para realizar los ensayos. Este instrumento es capaz de representar la forma de onda y realizar un informe, pero solo lo utilizaremos para producir el impulso y comparar las curvas del informe, con las curvas del osciloscopio. Este elemento se compone de distintos instrumentos, los cuales provoca el correcto funcionamiento del equipo, estos son:

-Cables de alimentación y pinzas Kelvin:

El equipo dispone de 4 cables con sus pinzas kelvin en los extremos para aplicar los transitorios y tomar medidas, y otro cable para la toma auxiliar de tierra. En función del ensayo que vayamos a realizar (número de terminales accesibles de la máquina), se conectarán más o menos pinzas. Cuando el equipo está desconectado, las sondas permanecen cortocircuitadas internamente a tierra, a través del equipo, por seguridad.



3.11 Pinza Kelvin

- Pulsador de seguridad de pie:

Tal y como se ha explicado, este pulsador permite aplicar los impulsos de otra forma, pero al ser un pulsador de pie es mucho más cómodo que el botón auxiliar. Este pulsador, permite llevar a cabo los ensayos de alta tensión sin correr peligro por la cercanía a los equipos implicados (las pinzas y el pulsador están lejos). El propio software avisa de la necesidad de activar el interruptor, y este debe permanecer pulsado durante todo el tiempo que dure la prueba.



3.12 Pulsador de pie

-Máquinas eléctricas a ensayar

En ellas se van realizar los ensayos y éstas van conectados tanto el osciloscopio como el generador de impulso (MTC2). Las máquinas que vamos a ensayar son las siguientes:

-Transformador de 23 kVA:



3.13 Transformador

Es un transformador trifásico de 50 Hz con refrigeración natural

Potencia	23 KVA
Año de fabricación	2000
Simbología de acoplamiento	Yzn11
Impedancia CC a 75°C (%)	4.03
Material AT/BT	Cu
Volumen [l] aislante a 20°C	95
Masa a desencubar [Kg]	182
Masa total [Kg]	328
Líquido aislante	Aceite
Alta tensión	
Tensión [kV]	15
Corriente	0.96 A
Baja tensión	
Línea en	2U-2V-2W
Tensión [V]	420
Corriente [A]	34
Potencia [KVA]	23

Tabla 2 Características del Transformador

Motor asíncrono 1:

Es un motor trifásico de 220/380 y 250 W.



3.14 Motor asíncrono 1 con las pinzas de ensayo conectadas

-Motor asíncrono 2

El motor es trifásico de la marca AEG (modelo AM 71 NY4 Q4) el cual tiene las siguientes características incluidas en la tabla:

IP55	
$\cos\alpha=0.73$	
Frecuencia (Hz)	50
Tensión [V] Δ/Y	220/380
Potencia [kW]	0.37
Intensidad [A]	2/1.16
Velocidad [rpm]	1374/1660
Variación de tensión [V]	220-240/380-420
Variación de intensidad[A]	2.1/1.22

Tabla 3 Características del Motor asíncrono 2

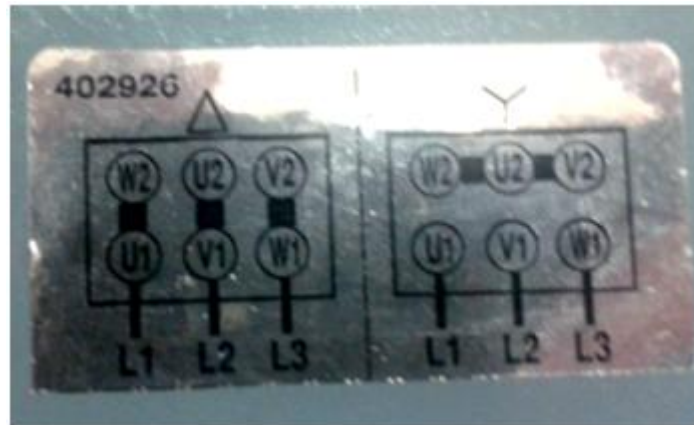


3.15 Motor asíncrono 2

Una vez descritas todas las características de todos los elementos e instrumentos que se van a utilizar en los distintos ensayos, se procede a describir los conexionados de cada ensayo que se va a realizar.

-Ensayos de los motores asíncronos:

Se realizaron los ensayos a los dos motores trifásicos descritos anteriormente. Al ser tan parecidos, los conexionados y las mediciones a realizar serán los mismos para los dos motores. Para realizar el ensayo, lo primero que se hizo es conectar a tierra todos los elementos metálicos accesibles (especialmente la carcasa) para la seguridad de los operarios, y después como medida de comprobación, se midió la continuidad entre la tierra y la carcasa del motor. A continuación, se conectó el estator del motor en estrella, porque así se pueden aplicar tensiones más elevadas. En la siguiente imagen se explica cómo se deben montar los conexionados:

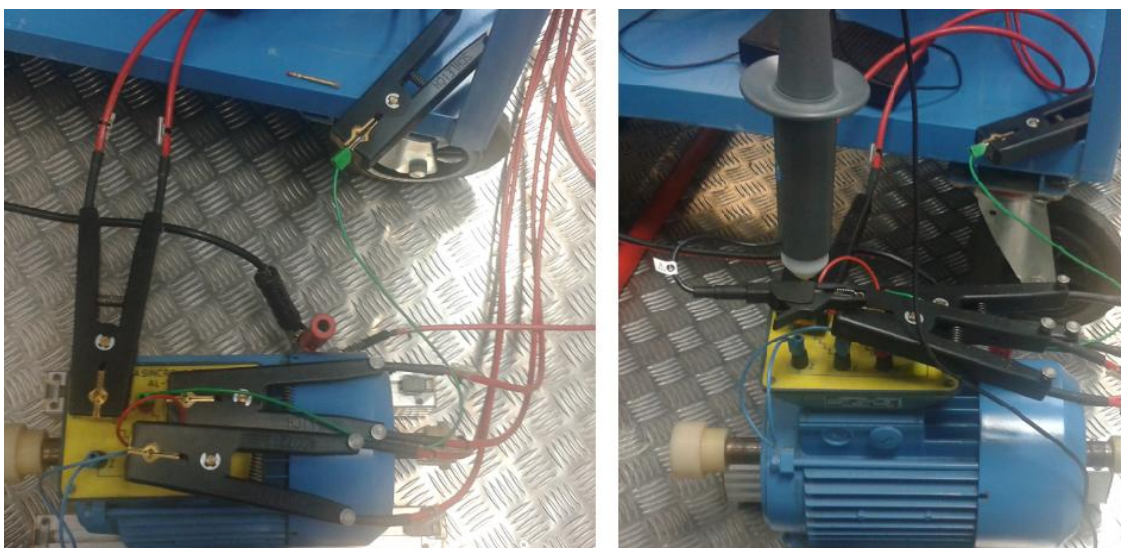


3.16 Conexión estrella-triángulo

Una vez realizado el conexionado interno, se conectó el generador de impulso (MTC2) con el motor de la siguiente forma: se conecta la pinza kelvin 1 con la fase del motor U, la pinza 2 con la fase del motor V, la pinza Kelvin 3 con la fase del motor W y por último se conecta la pinza Kelvin 4 con el neutro del motor.

Una vez conectado MTC2, se conectó la sonda del osciloscopio para poder realizar las mediciones oportunas, exportar los datos del ensayo y tomar las conclusiones oportunas. Para ello se escoge una sonda de 20 kV, la cual se conecta en uno de los 4 canales del osciloscopio; la parte activa de la sonda se conecta en una de las fases del motor y en el neutro.

En la siguiente imagen muestra el montaje de uno de los motores ensayados.



3.17 Conexión motor 1

Una vez que se ha conectado todo se hizo un pequeño ensayo de resistencia del devanado para comprobar que el motor se encuentra en perfecto estado; si al realizar este pequeño ensayo las resistencias son las mismas o muy parecidas, el motor está en perfecto estado. Después de esta pequeña comprobación, todo está listo para realizar el ensayo.

El ensayo consta de diferentes medidas con diferentes tensiones de impulso; 800 V, 1000 V y 1500 V. Las tensiones han sido elegidas según el IEEE Std 522-1992, esta norma nos indica cómo se debe realizar una medición donde no sufra el motor (V_1) y otra donde se pueda apreciar alguna descarga parcial, esta tensión depende del *rise time*. Como en un principio no conocemos el *rise time* haremos dos mediciones en lugar de una (V_2 y V_3).

- $V_1 = \sqrt{2}/\sqrt{3} \times V_L$
- $V_2 = 3.5 \times V_1$ *rise time* < 0.1 μ s
- $V_3 = 5 \times V_1$ *rise time* $\geq 1.2 \mu$ s

Para cada tensión también se registran los transitorios en el osciloscopio, pero con una escala de tiempo diferente, para que se puedan observar las diferentes partes de las ondas. Se realiza un registro de 500 μ s para observar el impulso completo, otra medición a 200 μ s para observar perfectamente la tensión pico-pico que se produce en la primera oscilación y por último, una medida mucho más pequeña de 10 μ s para poder observar el tiempo de conmutación ("*rise time*", el tiempo transcurrido entre el 10% hasta el 90% del valor de cresta de la onda).

Para cada una de las mediciones, se debe exportar del osciloscopio una captura de pantalla que represente las diferentes formas de onda (archivo TIFF) y una serie de datos que se utilizan para poder realizar los cálculos precisos y conocer las características básicas de las formas de onda (valor de cresta, valor pico-pico, *rise time* y frecuencia de oscilación); este archivo tiene un formato binario ASCII (compatible con Matlab) el cuál se abre con el *Software* WordPad.

-Ensayo de bobinado de baja del transformador:

El proceso experimental que se va a realizar, es el mismo que se ha descrito en el proceso experimental de los ensayos en motores. Pero ahora siendo las tensiones de 800 V, 1000 V y 1200 V, al igual que con los motores se realizará tres mediciones ya que no se conoce en un principio el *rise time*.

Para cada tensión también se hace dos mediciones con diferentes escalas de tiempos, para que se puedan observar las características generales de las ondas. Se realiza una medición de 100 μ s para observar el impulso completo y la tensión pico-pico, y la otra medida es mucho más pequeña de 20 μ s para poder observar el *rise time*.

En la actualidad no hay normativas que amparen el ensayo de bobinados de un transformador mediante el uso de este tipo de transitorios. En cualquier caso, en este trabajo sí se hicieron estas medidas para verificar que la adquisición de las ondas de tensión fuesen las adecuadas para los diferentes bobinados, y analizar el efecto que las diferentes impedancias de los bobinados tienen en la onda final aplicada.



3.18 Conexionado transformador de baja tensión

-Ensayo de bobinado de alta del transformador:

El proceso experimental que se va a realizar es el mismo que en los casos anteriores. La forma que se conecta el MTC2 es la siguiente; se conecta la pinza kelvin 1 con la fase del transformador U, la pinza Kelvin 2 con la fase del transformador V y la pinza

Kelvin 3 con la fase del transformador W. En este caso al no haber neutro, las tensiones se aplicarán entre fases.

Una vez que este todo conexionado, se empieza con el ensayo de impulso, que para estos casos las tensiones son 3000 V y 10000 V. Como se ha mencionado anteriormente no hay ninguna normativa para el ensayo del bobinado del transformador, con estas tensiones observaremos el comportamiento que tiene el transformador ante distintos impulsos

Al igual que antes, se realizan 2 mediciones con diferentes escalas de tiempo, para observar las características generales de la onda. En primer lugar, se realiza una medición de 50 μ s para observar el impulso completo y el valor pico-pico. En segundo lugar se realiza una medida mucho más pequeña de 10 μ s, para poder observar el *rise time*.



3.19 Conexionado del devanado de alta del transformador

4 Caracterización de la onda de choque del equipo MTC2

A continuación se van a mostrar los resultados de las distintas máquinas ensayada. Primero se mostrará el resultado del surge test (3 fases) y después se mostrará el resultado del osciloscopio y se compara.

4.1 Motor asíncrono 1

4.1.1 Ensayo a 800 V

Los resultados que muestra el equipo MTC2, contienen la medición de la resistencia de cada bobinado, la onda de choque aplicada a cada fase y un registro de los tres transitorios superpuestos.

Resumen	
Resistance 1-4	23.059 Ohm (25.6°C)
Resistance 2-4	22.941 Ohm (25.6°C)
Resistance 3-4	22.971 Ohm (25.7°C)
Deviation	0.511 %
Surge 1-4	743V, Area diferencial=2.4%, Area=0.2%, Cor.=0.2%, Amortiguación=0.0%, 51.3mH
Surge 2-4	743V, Area diferencial=4.9%, Area=0.1%, Cor.=0.6%, Amortiguación=0.3%, 50.6mH
Surge 3-4	743V, Area diferencial=3.8%, Area=0.7%, Cor.=0.3%, Amortiguación=0.6%, 51.9mH
Compare	743V, Area diferencial=4.6%, Area=0.5%, Cor.=0.3%, Amortiguación=0.7%, 52.0mH

Tabla 4 Resumen del MTC2

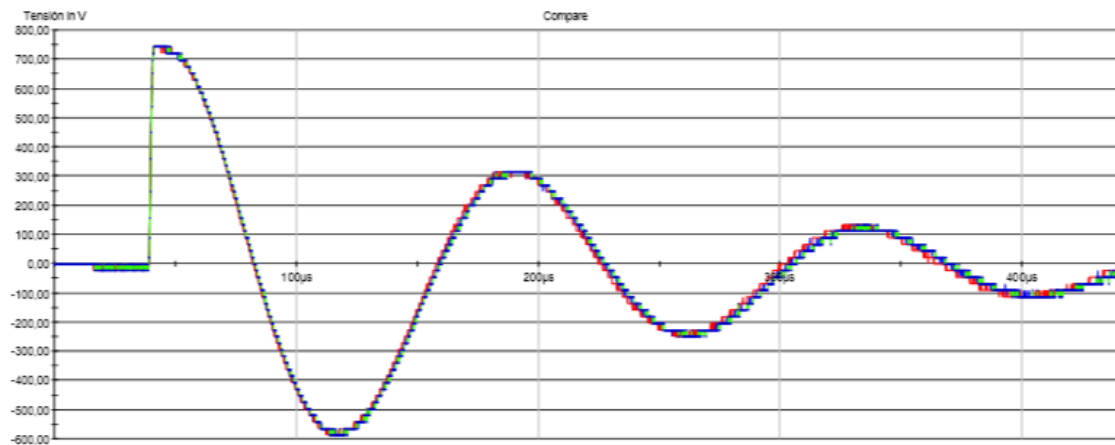
Como se muestra en la tabla resumen del surge test, las resistencias son muy parecidas entre sí, teniendo éstas una desviación del 0.511% que está por debajo del límite de 6% que recomienda la norma IEEE Std C57.16-1996. De igual forma pasa en las de inductancia, realizando un estudio estadístico dividiendo la máxima diferencia entre la media de las inductancias tenemos como resultado, un 2,7% de desviación.

A continuación se muestra las gráficas obtenidas por el MTC2, la primera es la gráfica perteneciente al ensayo secuencial de las tres fases y la segunda gráfica representa el ensayo individual de la fase 1.

En lo que respecta al transitorio de tensión se puede apreciar, que las formas de onda son casi idénticas (ver figura 4.1). Los valores de las inductancias calculadas son muy

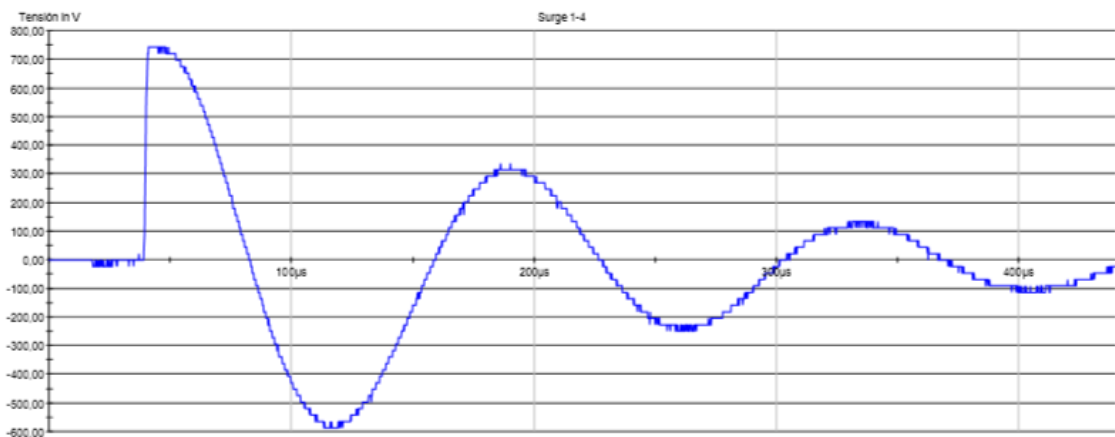
similares, lo que es coherente con la medida de resistencia en DC comentada anteriormente.

Los resultados muestran que el motor no presenta cortocircuitos entre espiras para estos niveles de tensión o, si los hubiera, estarían en las tres fases simultáneamente, circunstancia improbable.



4.1 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 800 V

Al comparar el ensayo secuencial y el ensayo individual se observa que son idénticas, teniendo la misma forma de onda, mismo período y mismo valores de tensiones.



4.2 Registro en MTC2 del ensayo individual (fase1) a 800 V

Al comparar el ensayo individual del registro del MTC2 con el registro de osciloscopio, se observa que la tensión mostrada por el osciloscopio es aproximadamente un 11% inferior. Mientras el tiempo de paso por cero de las oscilaciones es igual en los dos registros (50 µs, 120 µs, 190 µs, 260 µs y 330 µs mediciones tomadas desde el inicio

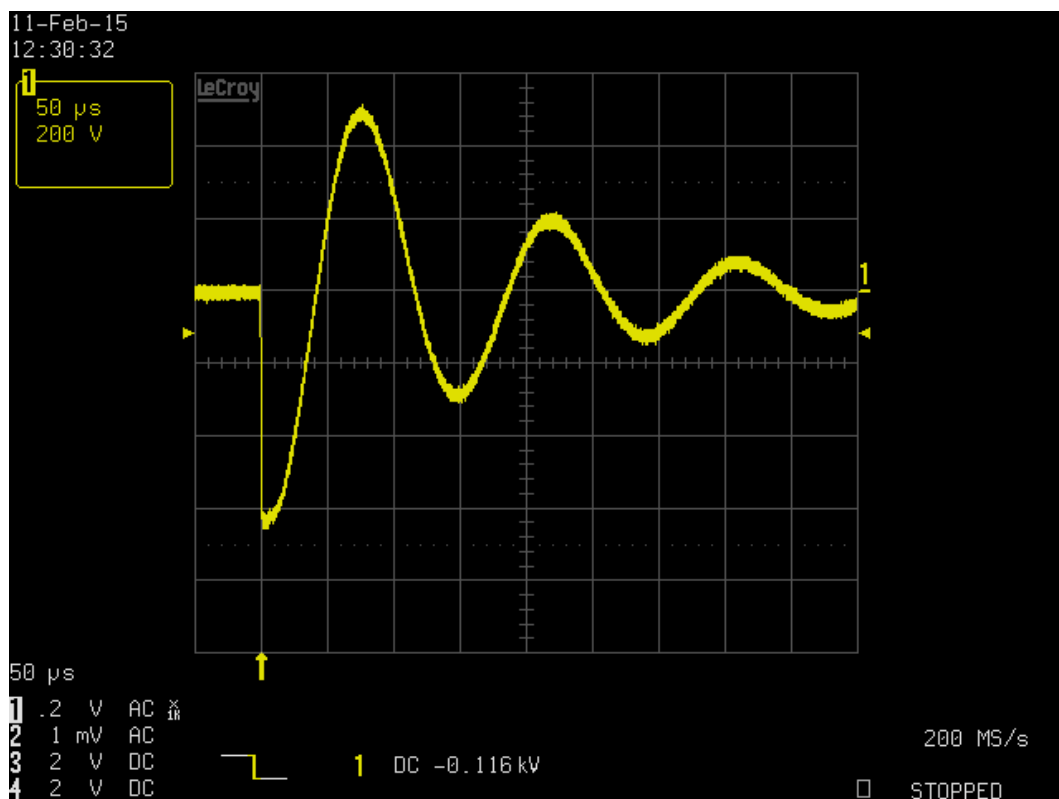
del impulso), aunque visualmente parece que existe un desfase de unos 10 μs que es producido por el pre-trigger del osciloscopio, que a ser fijado de una manera arbitraria se desecha.

A continuación se muestran los resultados en el osciloscopio del ensayo a 800 V en el motor asíncrono 1, en la primera imagen del osciloscopio muestra la magnitud y la duración del impulso aplicado. Después, hay una segunda imagen, con una escala de tiempo inferior para poder resolver bien el tiempo de conmutación, ya que éste es demasiado rápido y en la primera imagen no se puede apreciar.

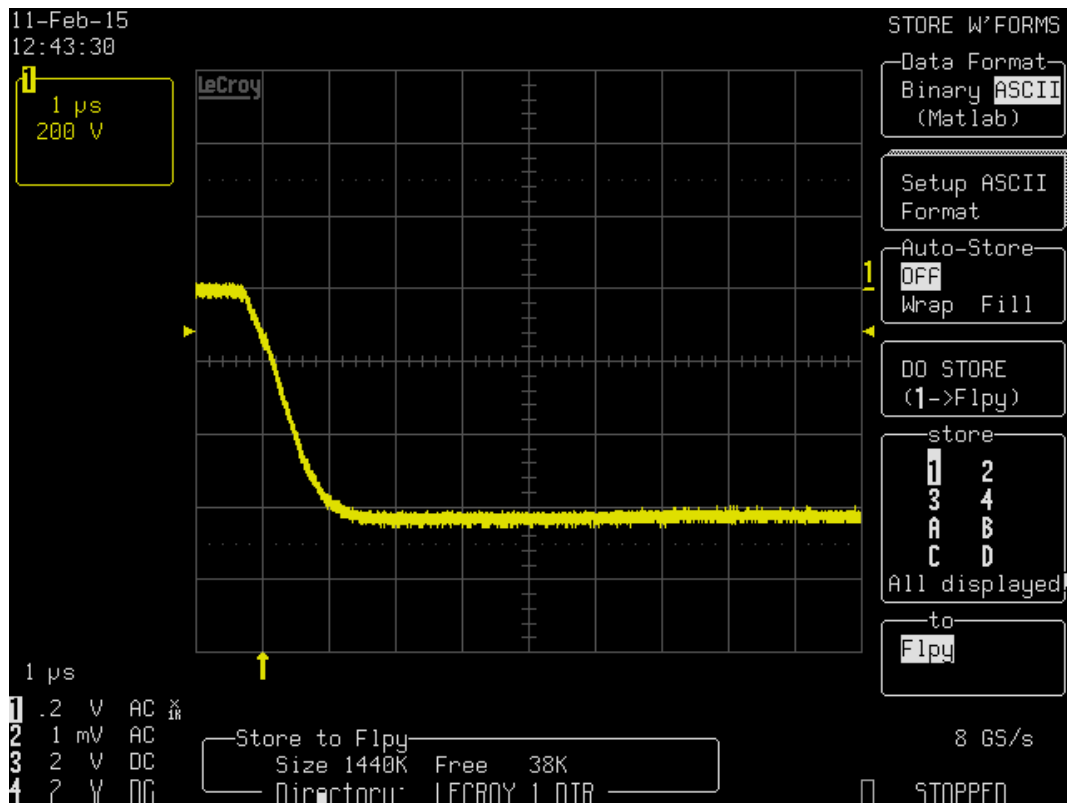
Las características de esta onda son:

Tensión de ensayo	800 V
Tiempo de estabilización	450 μs
Tensión de pico	656.25 V
Tensión pico a pico	1168.8 V
Frecuencia de oscilación	6796.33 Hz
Rise time	1.119 μs

Tabla 5 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio



4.3 Oscilograma del transitorio de 800 V para 50 $\mu\text{s}/\text{div}$



4.4 Oscilograma del transitorio de 800 V para 1 μ s/div

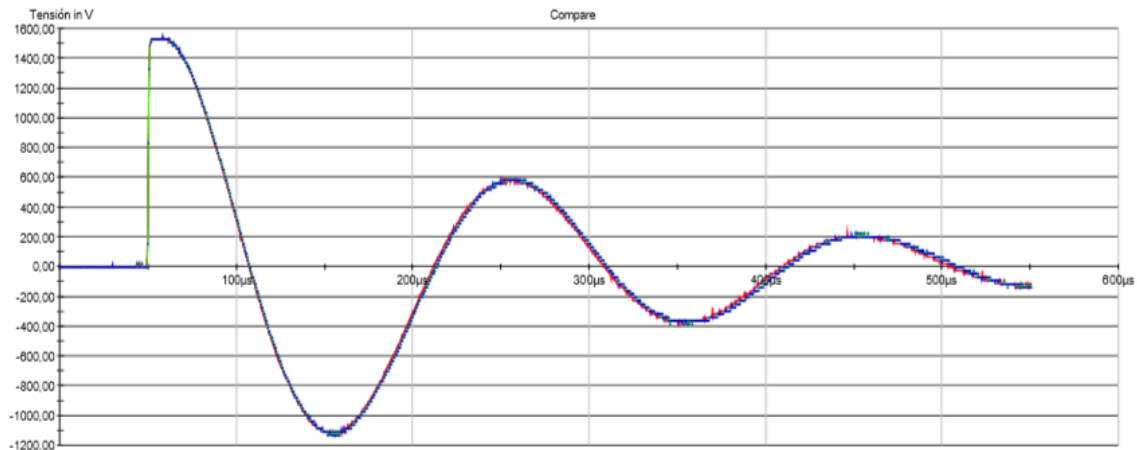
4.1.2 Ensayo a 1000 V

Al igual que en el ensayo a 800 V se mostrarán los resultados obtenidos en el MTC2 y posteriormente los resultados obtenidos en el osciloscopio.

Resumen	
Resistance 1-4	23.059 Ohm (25.6°C)
Resistance 2-4	22.941 Ohm (25.6°C)
Resistance 3-4	22.971 Ohm (25.7°C)
Deviation	0.511 %
Surge 1-4	967V, Area diferencial=1.6%, Area=0.3%, Cor.=0.1%, Amortiguación=0.4%, 51.8mH
Surge 2-4	967V, Area diferencial=2.4%, Area=0.4%, Cor.=0.1%, Amortiguación=0.5%, 51.9mH
Surge 3-4	970V, Area diferencial=3.6%, Area=0.4%, Cor.=0.2%, Amortiguación=0.4%, 51.6mH
Compare	1530V, Area diferencial=3.5%, Area=0.7%, Cor.=0.1%, Amortiguación=1.1%, 99.0mH

Tabla 6 Resumen del MTC2 a 1000 V

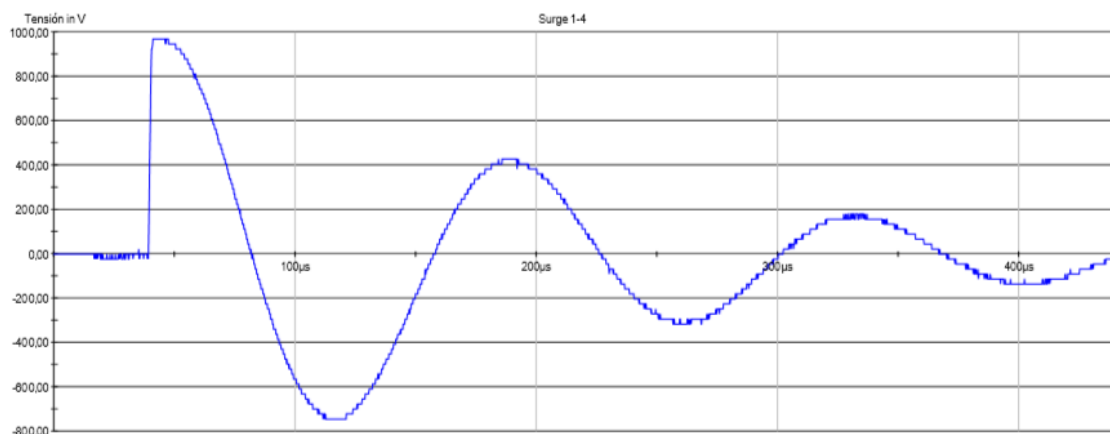
Al ser el mismo motor, las resistencias no varían con respecto al ensayo anterior, teniendo una desviación de 0.511%. De igual forma pasa con las inductancias, donde tiene un 74% de desviación, esta gran desviación es producida por la onda de los tres transitorios superpuestos, porque esta es bastante diferente que las inductancias de los ensayos individuales.



4.5 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 1000 V

En lo que respecta al transitorio de tensión se puede apreciar, que las formas de onda son casi idénticas, puesto que están superpuestas (ver figura 4.5), y por tanto, el motor no presenta cortocircuitos entre espiras a estos niveles de tensión o que, si los hubiera, estarían en las tres fases simultáneamente, circunstancia improbable.

Sí se compara el ensayo secuencial y el ensayo individual, se observa que tiene la misma forma de onda pero cambian los parámetros de la tensión y el período.



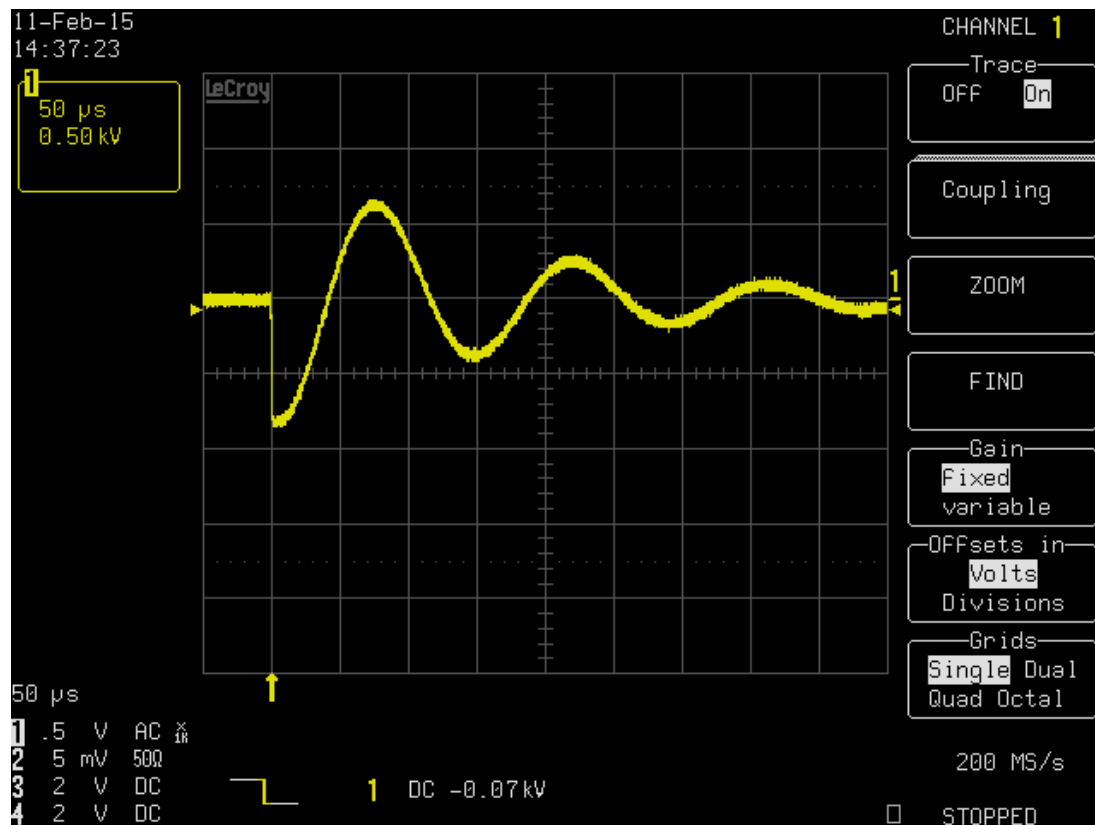
4.6 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 1000 V

En la imagen 4.6, se observa el impulso de tensión entre 1-4 registrado por el MTC2, que, si se compara, con la onda que representa el osciloscopio (ver, figura 4.7) muestra como la tensiones del osciloscopio son aproximadamente 11% menores, mientras los tiempos de paso por cero de las oscilaciones tiene grandes similitudes entre sus valores (tiempos aproximados de 40 μ s, 115 μ s, 185 μ s, 260 μ s y 325 μ s mediciones tomadas desde el inicio del impulso). Esto significa que los dos instrumentos muestran la misma onda con la única diferencia que el osciloscopio muestra la onda invertida, lo que simplemente se debe a un cambio en la polaridad de las conexiones.

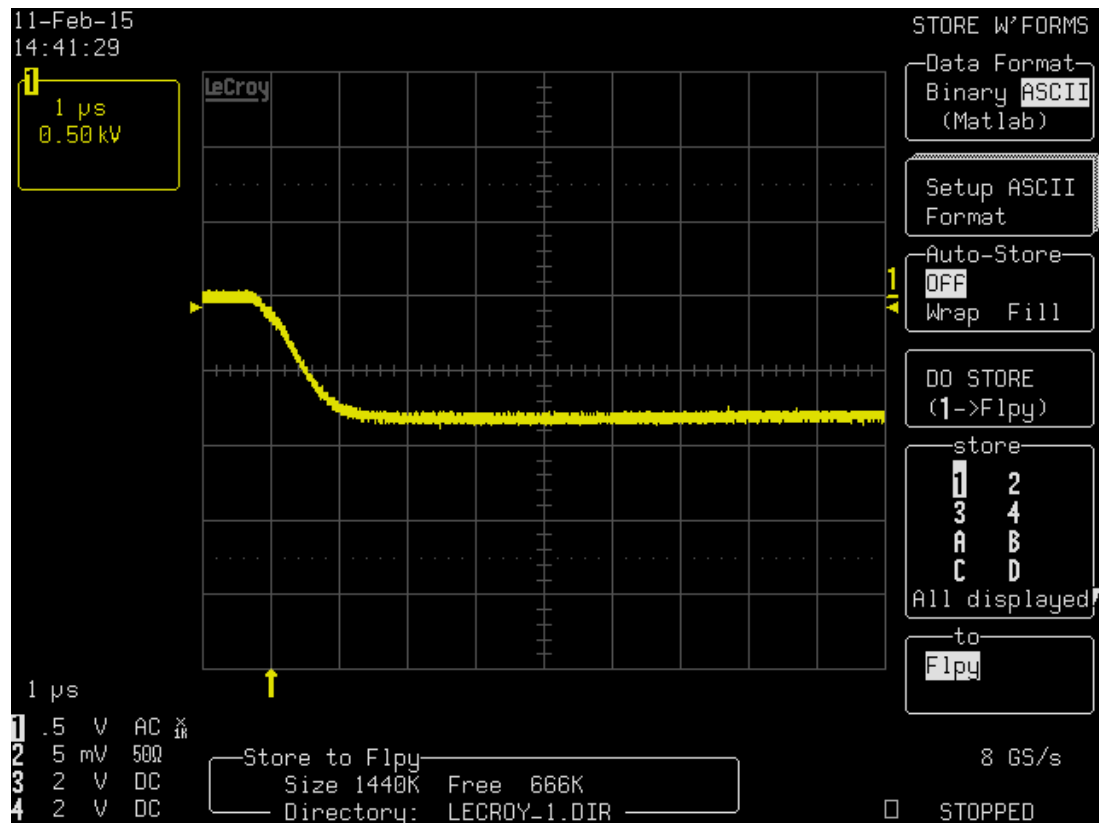
A continuación se muestra los resultados sacado del osciloscopio:

Tensión de ensayo	1000 V
Tiempo de estabilización	450 μ s
Tensión de pico	859.38 V
Tensión pico a pico	1515.63 V
Frecuencia de oscilación	6898.636 Hz
Rise time	1.409 μ s

Tabla 7 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio



4.7 Oscilograma del transitorio de 1000 V para 50 μ s/div



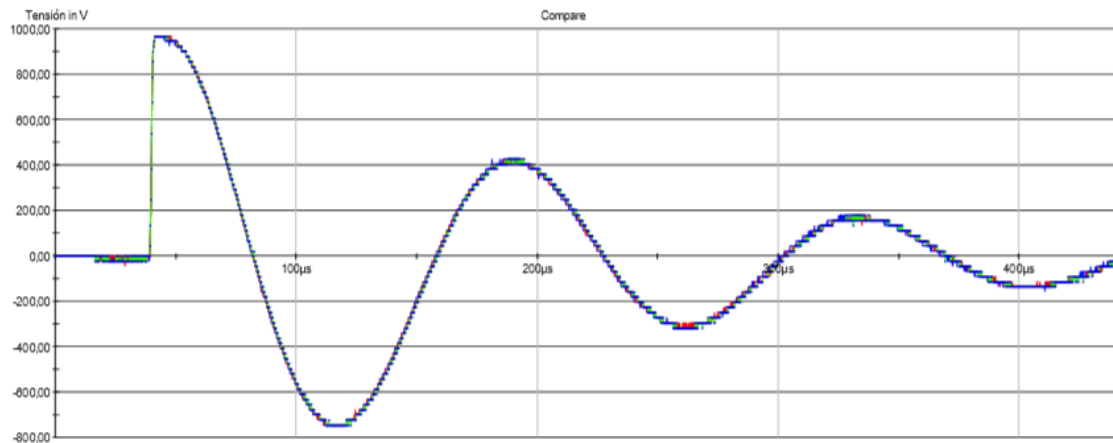
4.8 Oscilograma del transitorio de 1000 V para 1 μ s/div

4.1.3 Ensayo a 1500 V

Resumen	
Resistance 1-4	23.059 Ohm (25.6°C)
Resistance 2-4	22.941 Ohm (25.6°C)
Resistance 3-4	22.971 Ohm (25.7°C)
Deviation	0.511 %
Surge 1-4	1508V, Area diferencial=1.8%, Area=0.0%, Cor.=0.5%, Amortiguación=0.0%, 51.1mH
Surge 2-4	1508V, Area diferencial=2.9%, Area=0.9%, Cor.=0.2%, Amortiguación=1.1%, 51.5mH
Surge 3-4	1505V, Area diferencial=3.8%, Area=0.3%, Cor.=0.6%, Amortiguación=0.3%, 55.5mH
Compare	967V, Area diferencial=3.7%, Area=0.6%, Cor.=0.3%, Amortiguación=0.6%, 52.3mH

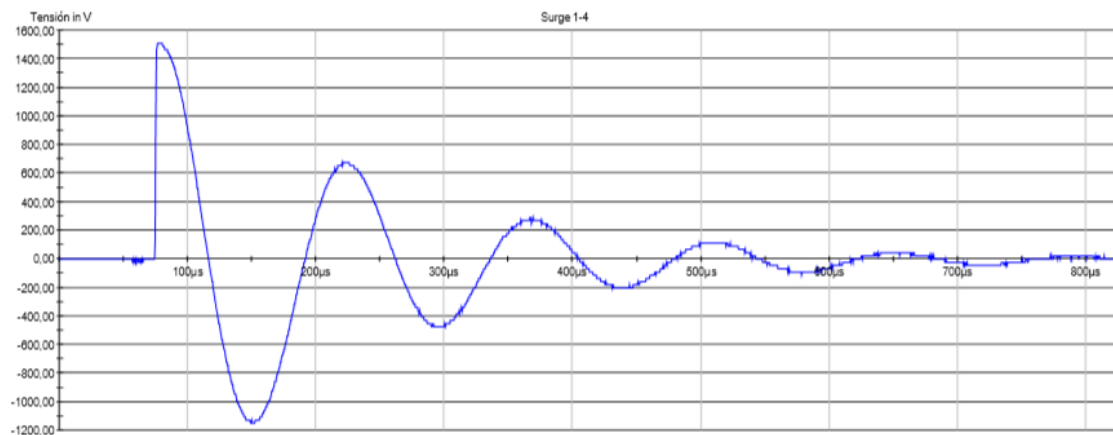
Tabla 8 Resumen del MTC2 a 1500 V

Al ser el mismo motor se observa que las resistencias son las mismas que en los anteriores. Si se compara las tensiones de los ensayos individuales y del ensayo secuencial de las 3 fases se puede observar un fenómeno. Este fenómeno es que la todas la tensiones individuales esta alrededor de unos 1500 V, mientras en el ensayo secuencial dicha tensión es inferior de 967 V.



4.9 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 1500 V

Como se observa en la imagen 4.9, la diferencia en las distintas onda es muy pequeña ya que se superponen entre sí, formando una única onda; igualmente, la inductancias presentan desviaciones relativas de un 8.35%. Sin embargo, si comparamos las 3 ondas superpuestas con las registradas en los ensayos individuales de cada fase (ver figura 4.10), aquellas presentan menor tensión y mismo período de la onda, aunque a simple vista parezca que varía el período es porque en la gráfica no son iguales, esto es debido a que cada gráfica tiene diferente escala de tiempo.



4.10 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 1500 V

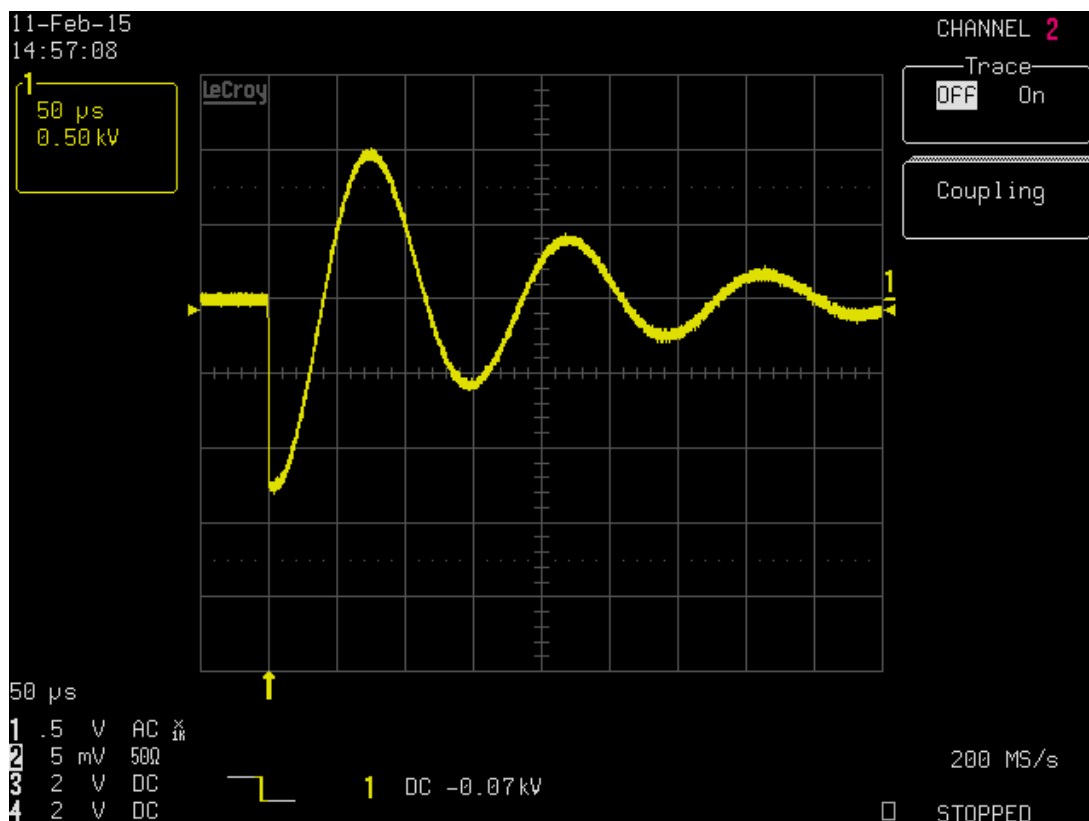
La imagen 4.10, muestra el ensayo individual de la fase 1, elaborado por el MTC2, esta onda, si se comparase a los parámetros de la tensión y el período con la onda que representa el osciloscopio (mostrada posteriormente) se observa que la onda del MTC2 tienen los picos de tensión en unos 1500 V, -1180 V, 700 V, -500 V, 300 V, -200 V y 180 V, mientras que la onda representada en el osciloscopio esos picos de tensión son un 13% inferiores. Los tiempos de paso por cero en el MTC2 y en el osciloscopio son iguales con unos valores aproximados de 45 μ s, 120 μ s, 190 μ s, 270 μ s, 340 μ s, 405 μ s y 480 μ s.

Lo que significa que los dos instrumentos muestran la misma onda con la única diferencia que el osciloscopio muestra la onda invertida.

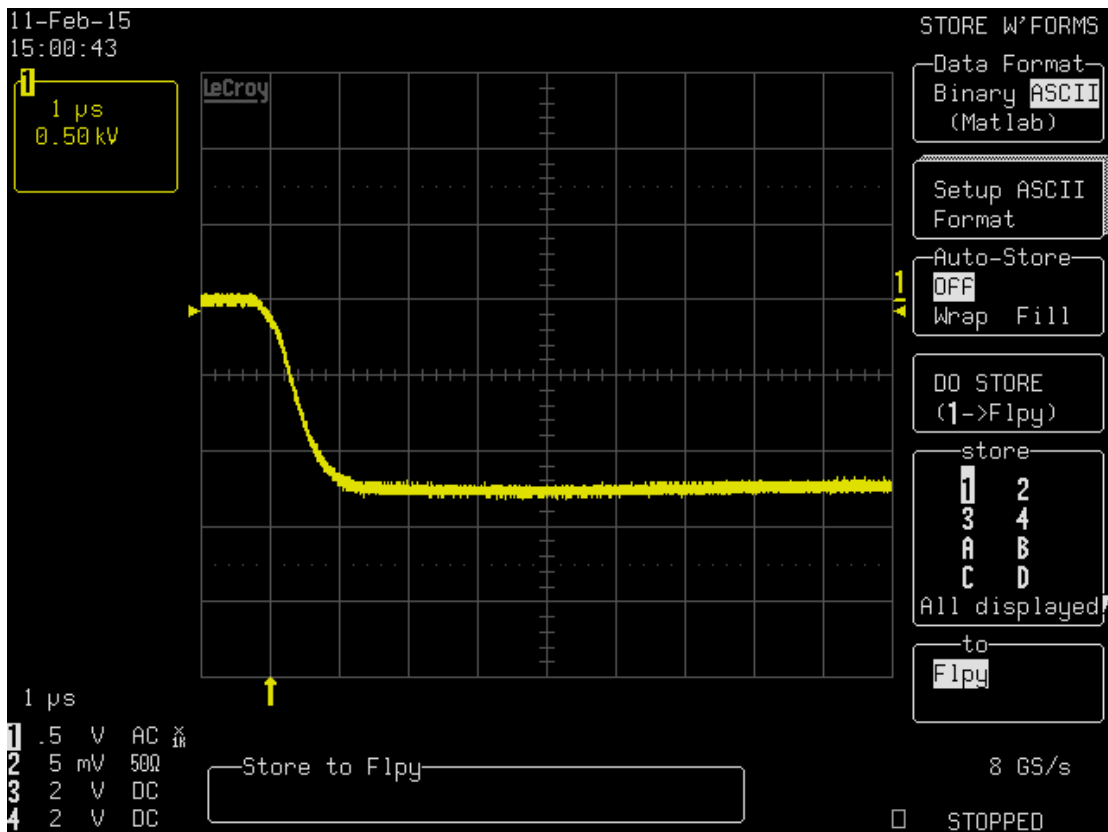
A continuación se muestran los resultados sacados del osciloscopio:

Tensión de ensayo	1500 V
Tiempo de estabilización	450 μ s
Tensión de pico	1312.50 V
Tensión pico a pico	2328.1 V
Frecuencia de oscilación	6970.939 Hz
Rise time	1.097 μ s

Tabla 9 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio



4.11 Oscilograma del transitorio de 1500 V para 50 μ s/div



4.12 Oscilograma del transitorio de 1500 V para 1 μ s/div

En la primera imagen del osciloscopio, se observa la magnitud y la duración del impulso aplicado, donde empieza con un pico de tensión y después la onda se va amortiguando con una forma sinusoidal hasta que se estabiliza. En la segunda imagen del osciloscopio tiene una escala de tiempo inferior para poder calcular con mayor precisión el rise time, ya que este es demasiado rápido en la primera imagen y no se puede apreciar.

A continuación se muestra una tabla resumen con los resultados de cada ensayo para poder comparar entre ellos:

U test [V]	Umtc2 [V]	Up [V]	Upp [V]	Fre_osci [Hz]	Rise time [μ s]
800	743	656.25	1168.8	6796.33	1.119
1000	967	859.38	1515.63	6898.636	1.409
1500	1508	1312.50	2328.1	6970.939	1.097

Tabla 10 Resultados de los distintos ensayos

Según las mediciones tomadas, se pueden observar, que el tiempo de estabilización es de unos 500 μ s y no varía para los diferentes impulsos. Por otro lado también se observa que la tensión de pico, es inferior a la tensión del ensayo, pero esta diferencia es menor cuanto mayor es la tensión. En nuestro caso, cuando la tensión de consigna es de 800 V, la tensión de pico es un 17,8% inferior, para 1000 V, es un 14% inferior y

con 1500 V, la tensión de pico es 12% inferior. En cuanto a la tensión de pico a pico se observa, que es superior a la tensión del ensayo, estas diferencias de tensiones se pueden apreciar perfectamente en la 1ª imagen de cada uno de los ensayos mostrada en el osciloscopio.

Al estudiar el efecto que produce un incremento en la tensión de consigna sobre la tensión pico a pico se puede observar que, si se incrementa un 20% la tensión la tensión de consigna, se produce un incremento del 29.7% en la tensión pico a pico y al aumentar en un 87.5% la tensión de consigna se produce un incremento del 99.2% en la tensión pico a pico.

En cuanto a la frecuencia de oscilación se observa, que la frecuencia de oscilación aumenta cuando aumentamos la tensión del impulso, aunque esta variación es muy pequeña ya que con 1000 V solo ha aumentado un 1,5% y con 1500 V aumenta 2,5%. Si observamos el *rise time* no se observa tendencia alguna, ya que para 800 V el *rise time* es menor que para 1000 V y mayor que en la tensión de consigna de 1500 V.

Como se puede comprobar, la tensión de consigna y la tensión medida en el MTC2 varían ligeramente, pero estas desviaciones no se consideran significativas.

4.2 Motor asíncrono 2

Igual que con el motor asíncrono 1, en este apartado se va mostrar los resultados de los ensayo a 800 V, 1000 V y 1500 V que muestra el equipo MTC2 y el osciloscopio, junto con una descripción de dichos resultados y una comparación entre ellos.

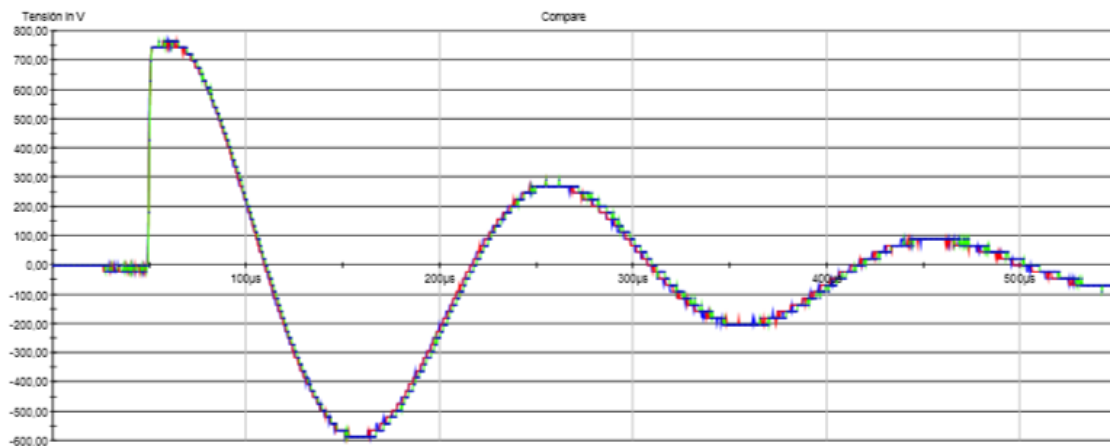
4.2.1 Ensayo a 800 V

Resumen	
Resistance 1-4	23.059 Ohm (25.6°C)
Resistance 2-4	22.941 Ohm (25.6°C)
Resistance 3-4	22.971 Ohm (25.7°C)
Deviation	0.511 %
Surge 1-4	763V, Area diferencial=2.5%, Area=0.1%, Cor.=0.1%, Amortiguación=0.2%, 94.3mH
Surge 2-4	760V, Area diferencial=2.1%, Area=0.2%, Cor.=0.3%, Amortiguación=0.1%, 94.4mH
Surge 3-4	763V, Area diferencial=5.5%, Area=1.8%, Cor.=0.4%, Amortiguación=2.7%, 57.8mH
Compare	760V, Area diferencial=6.7%, Area=1.6%, Cor.=0.4%, Amortiguación=3.1%, 97.2mH

Tabla 11 Resumen del MTC2 a 800 V

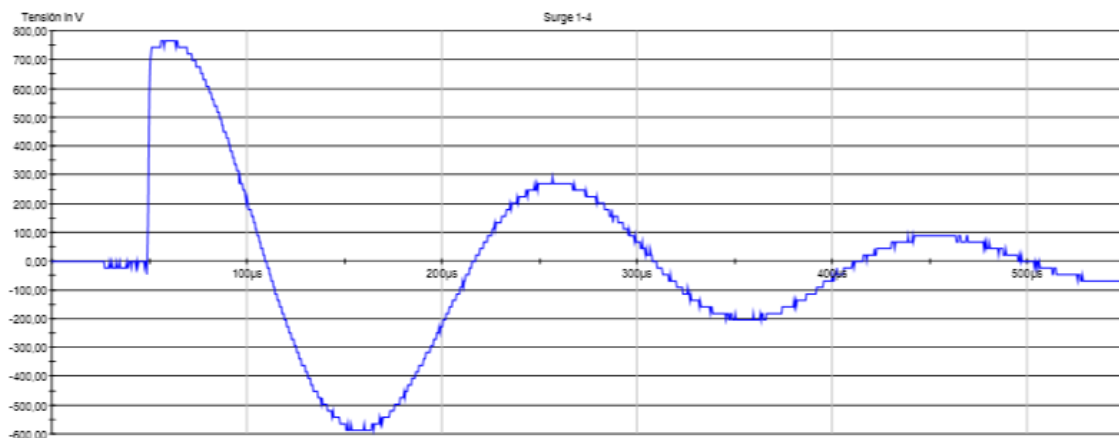
En este ensayo se sigue observado, que las resistencias en cada bobinado son muy parecidas, ya que solo hay un 0,511% de desviación. Mientras que las desviación de las inductancias son de un 40%, esta gran desviación es debida al *surge test* 3-4 ya que es muy inferior a las demás.

En lo que se refiere a las tensiones, se observa que en la medida de los impulsos individuales y la comparativa entre los transitorios aplicados secuencialmente, tiene muy poca diferencia, los valores de tensiones de crestas son 760 V y 763 V. Nuevamente se puede apreciar que estos transitorios no provocan cortocircuitos entre espiras.



4.13 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 800 V

En este caso, la forma de onda del surge test para una fase y la onda comparativa de las tres fases se puede apreciar que son muy parecidas ya que tienen las mismas magnitudes de oscilación (de unos 750 V, -600 V, 300 V, -200 V y 100 V). En cuanto a los tiempos de paso por cero de las señales, también son iguales (en torno a 60 µs, 170 µs, 260 µs, 360 µs y 450 µs).



4.14 Registro MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 800 V

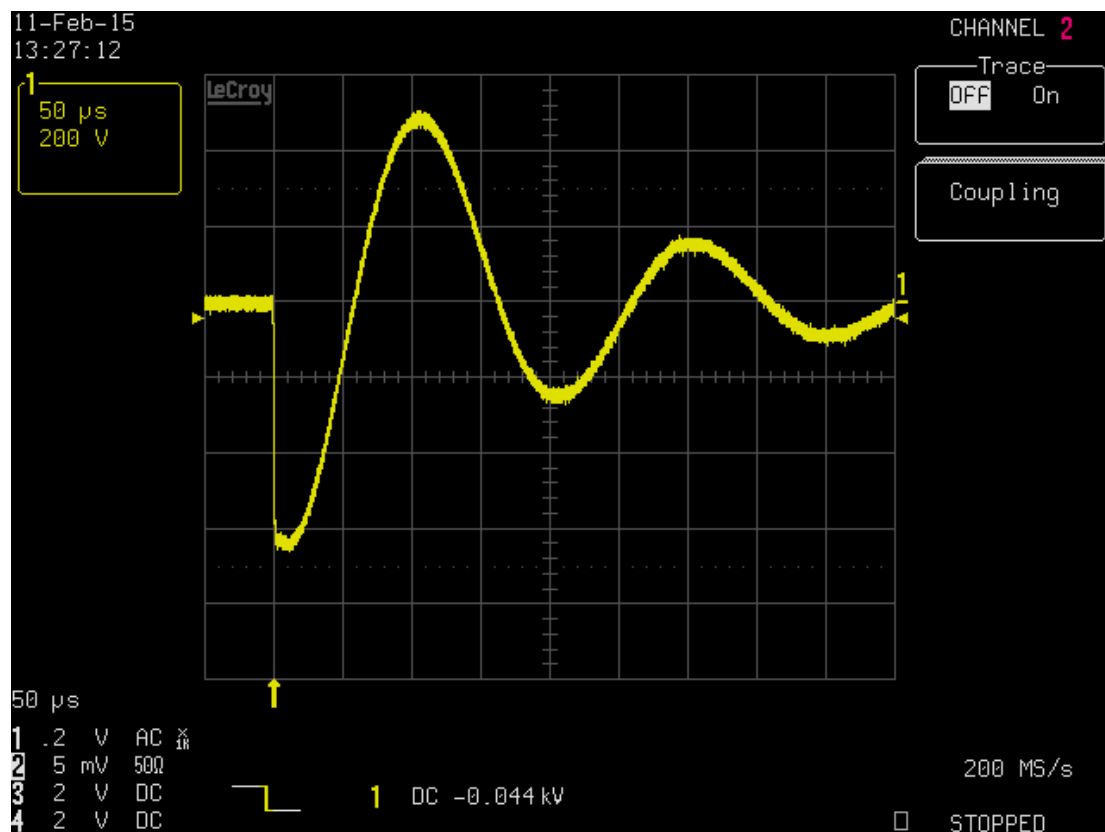
Comparando el registro individual del MTC2 y del osciloscopio se vuelve a observar que las tensiones son un 13% inferior en el osciloscopio mientras, los tiempos de paso por cero son iguales en ambos registros.

A continuación se muestran los resultados en el osciloscopio

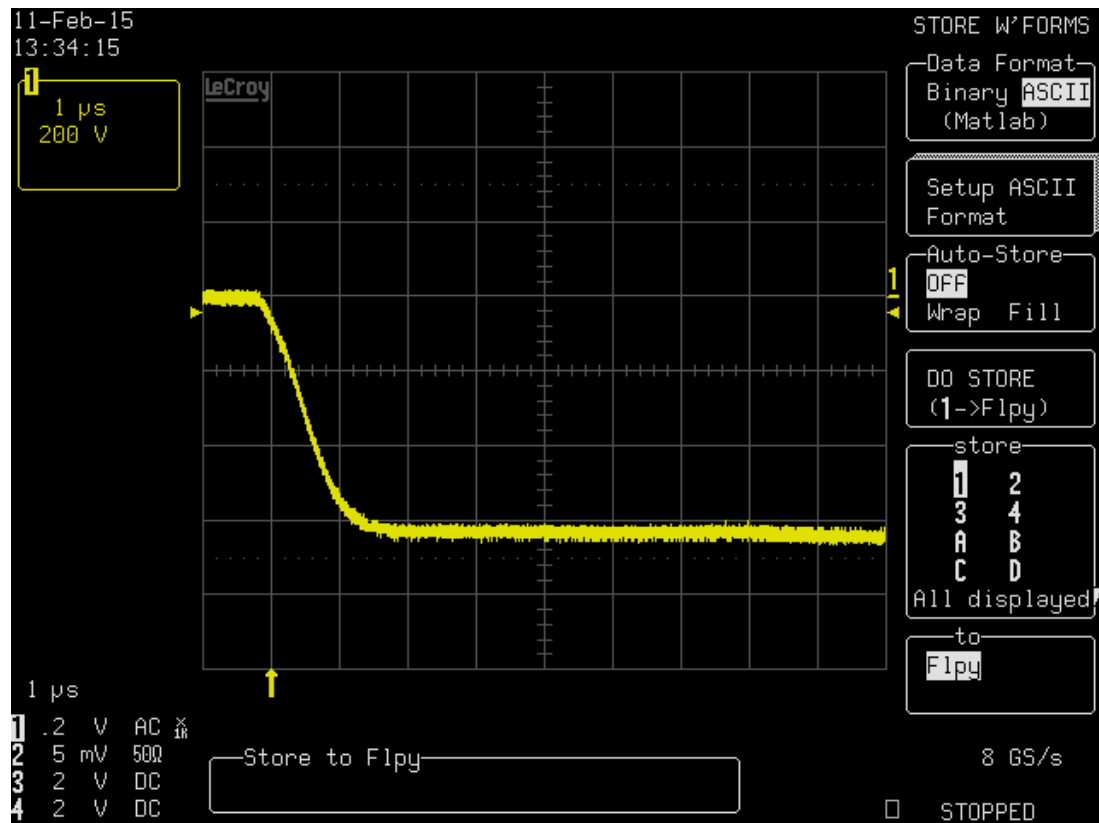
Las características de esta onda son:

Tensión de ensayo	800 V
Tiempo de estabilización	700 μ s
Tensión de pico	662.50 V
Tensión pico a pico	1168.75 V
Frecuencia de oscilación	5001.43 Hz
Rise time	1.323 μ s

Tabla 12 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio



4.15 Oscilograma del transitorio de 800 V para 50 μ s/div



4.16 Oscilograma del transitorio de 800 V para 1 μ s/div

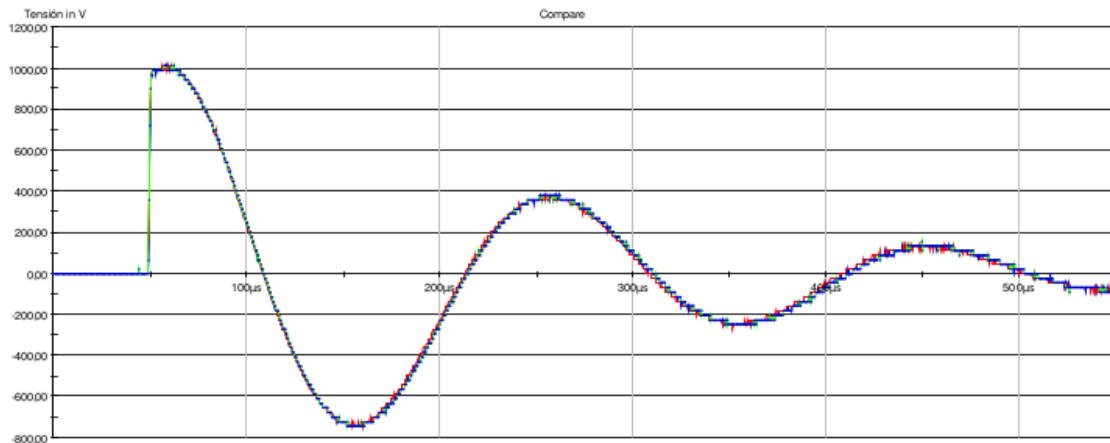
4.2.2 Ensayo 1000 V

Resumen	
Resistance 1-4	23.059 Ohm (25.6°C)
Resistance 2-4	22.941 Ohm (25.6°C)
Resistance 3-4	22.971 Ohm (25.7°C)
Deviation	0.511 %
Surge 1-4	995V, Area diferencial=1.5%, Area=0.2%, Cor.=0.1%, Amortiguación=0.0%, 94.8mH
Surge 2-4	997V, Area diferencial=2.1%, Area=1.0%, Cor.=0.1%, Amortiguación=1.2%, 93.9mH
Surge 3-4	1003V, Area diferencial=3.9%, Area=0.6%, Cor.=0.2%, Amortiguación=0.7%, 95.9mH
Compare	1003V, Area diferencial=3.1%, Area=0.8%, Cor.=0.3%, Amortiguación=1.4%, 94.0mH

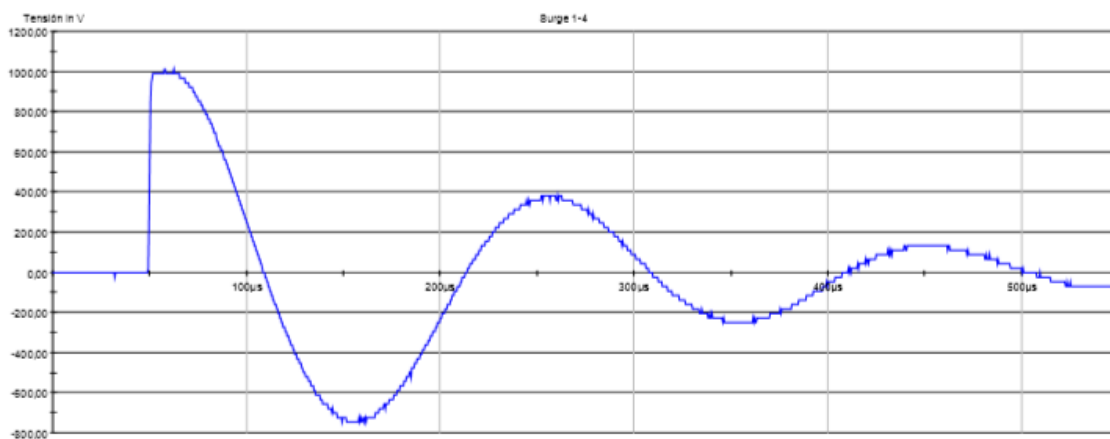
Tabla 13 Resumen del MTC2 a 1000 V

En este ensayo se sigue observado, que las resistencias en cada bobinado son muy parecidas, ya que solo hay un 0,511% de desviación. Mientras las desviaciones de las inductancias son de un 2.11% mucho más pequeña que en el caso anterior.

En lo que se refiere a las tensiones, se observa que en la medida de los impulsos individuales y la comparativa entre los transitorios aplicados secuencialmente, tienen muy poca diferencia, los valores de tensiones de crestas que se encuentran entre 995 V y 1003 V. A través de la frecuencia de oscilación se calcula la inductancia de las tres fases, que resulta ser bastante parecida. Nuevamente se puede apreciar que estos transitorios no provocan cortocircuitos entre espiras.



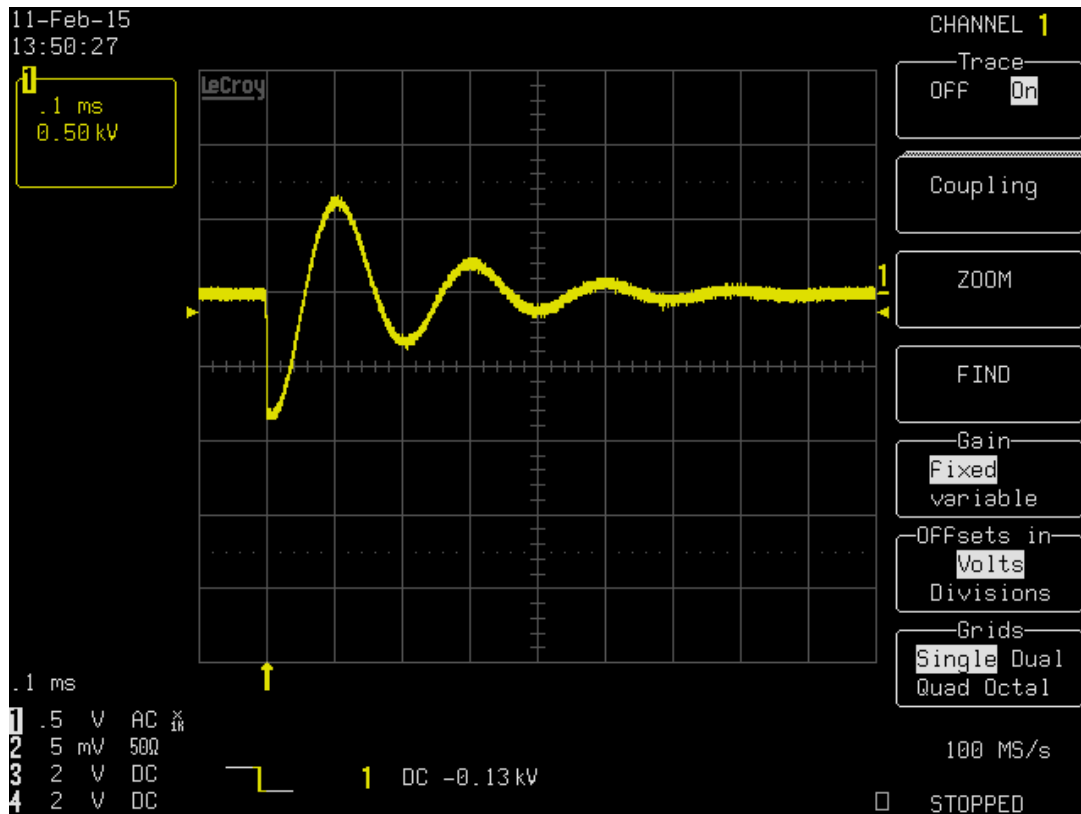
4.17 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 1000 V



4.18 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 1000 V

En este caso, la forma de onda del surge test para una fase y la onda comparativa de las tres fases se puede apreciar que son muy parecidas ya que tienen las mismas magnitudes de oscilación (de unos 1000 V, -750 V, 400 V, -220 V y 130 V). En cuanto a los tiempos de paso por cero de las señales, también son iguales (en torno a 50 µs, 160 µs, 250 µs, 360 µs y 440 µs).

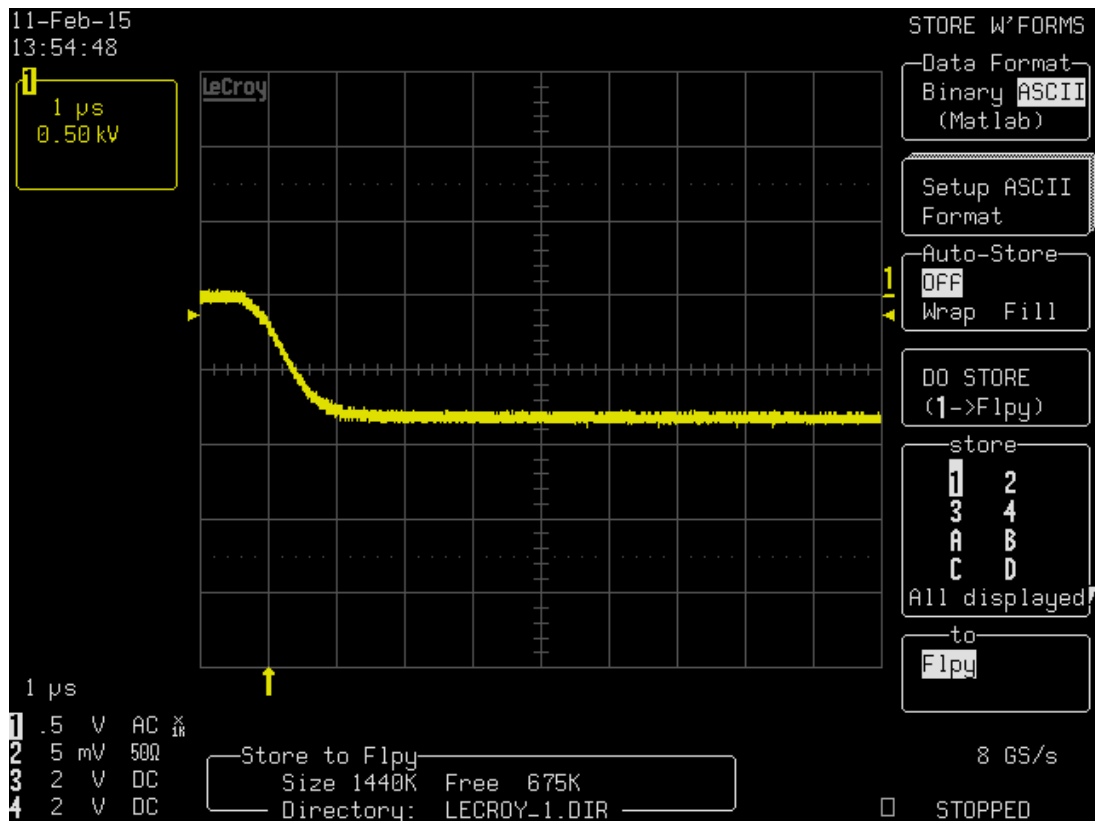
Si comparamos las dos formas de ondas anteriores, con la que se produce en el osciloscopio, se puede seguir observándose que la tensión en el osciloscopio es un 13.6% inferior y que los tiempos por cero son iguales, aunque en este caso esta apreciación no es tan clara debido a las escala de tiempo y tensión.



4.19 Oscilograma del transitorio de 1000 V para 1 ms/div

Tensión de ensayo	1000 V
Tiempo de estabilización	700 μ s
Tensión de pico	859.38 V
Tensión pico a pico	1515.63 V
Frecuencia de oscilación	5001.36 Hz
Rise time	1.482 μ s

Tabla 14 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio



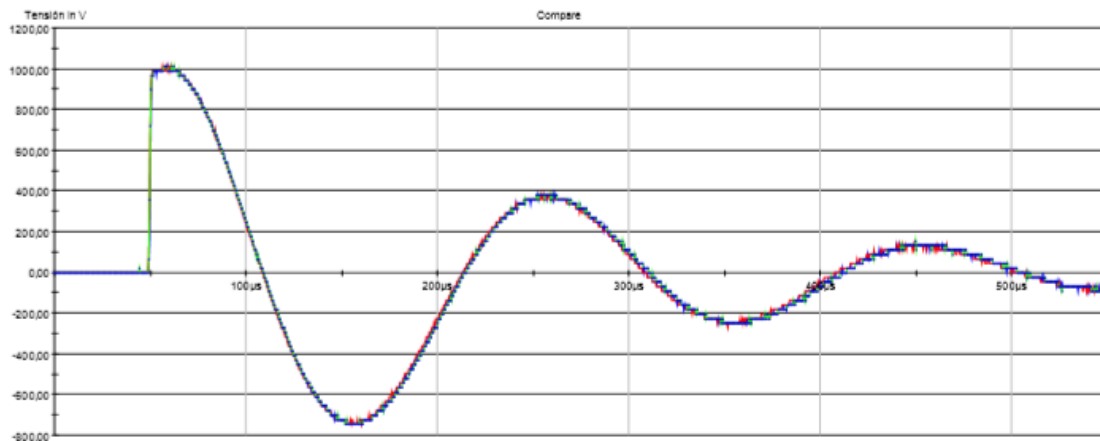
4.20 Oscilograma del transitorio de 1000 V para 1 μ s/div

4.2.3 Ensayo 1500 V

Resumen		
Resistance 1-4	23.059 Ohm (25.6°C)	Compro
Resistance 2-4	22.941 Ohm (25.6°C)	Compro
Resistance 3-4	22.971 Ohm (25.7°C)	Compro
Deviation	0.511 %	Compro
Surge 1-4	1530V, Area diferencial=1.5%, Area=0.2%, Cor.=0.2%, Amortiguación=0.4%, 96.1mH	Compro
Surge 2-4	1533V, Area diferencial=1.4%, Area=0.6%, Cor.=0.1%, Amortiguación=0.5%, 96.4mH	Compro
Surge 3-4	1530V, Area diferencial=4.4%, Area=0.7%, Cor.=0.3%, Amortiguación=1.0%, 98.7mH	Compro
Compare	1003V, Area diferencial=3.1%, Area=0.8%, Cor.=0.3%, Amortiguación=1.4%, 94.0mH	Compro

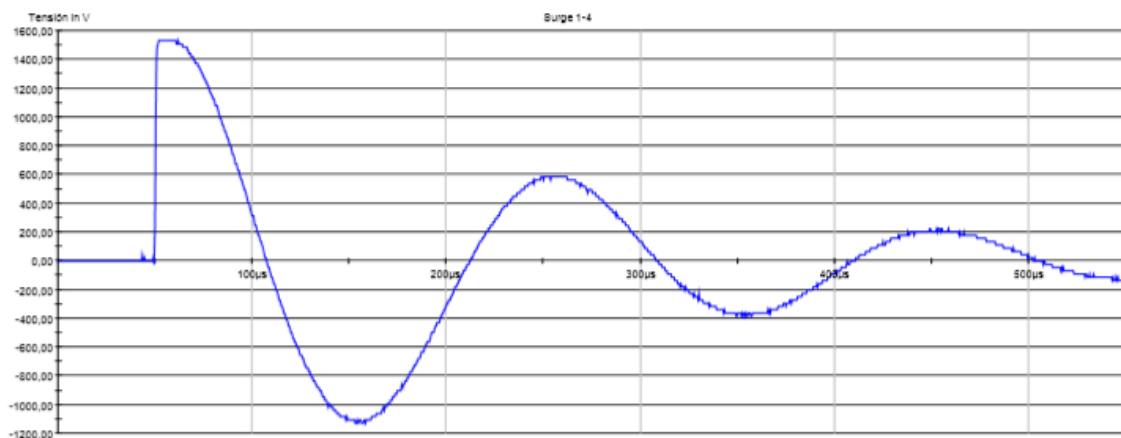
Tabla 15 Resumen del MTC2 a 1500 V

Como se observa en la tabla resumen, las resistencias vuelven a ser muy parecidas entre sí. También se puede apreciar que las tensiones de los ensayos individuales son casi las mismas, ya que los valores comprenden entre 1530 V a 1533 V. Sin embargo, y al contrario de lo observado en el ensayo a 1000 V, el registro que superpone los 3 impulsos, tiene una tensión de cresta inferior a la de los ensayos individuales, en unos 530 V. En cuanto a lo que se refiere la inductancia tiene una desviación de 4.88%.



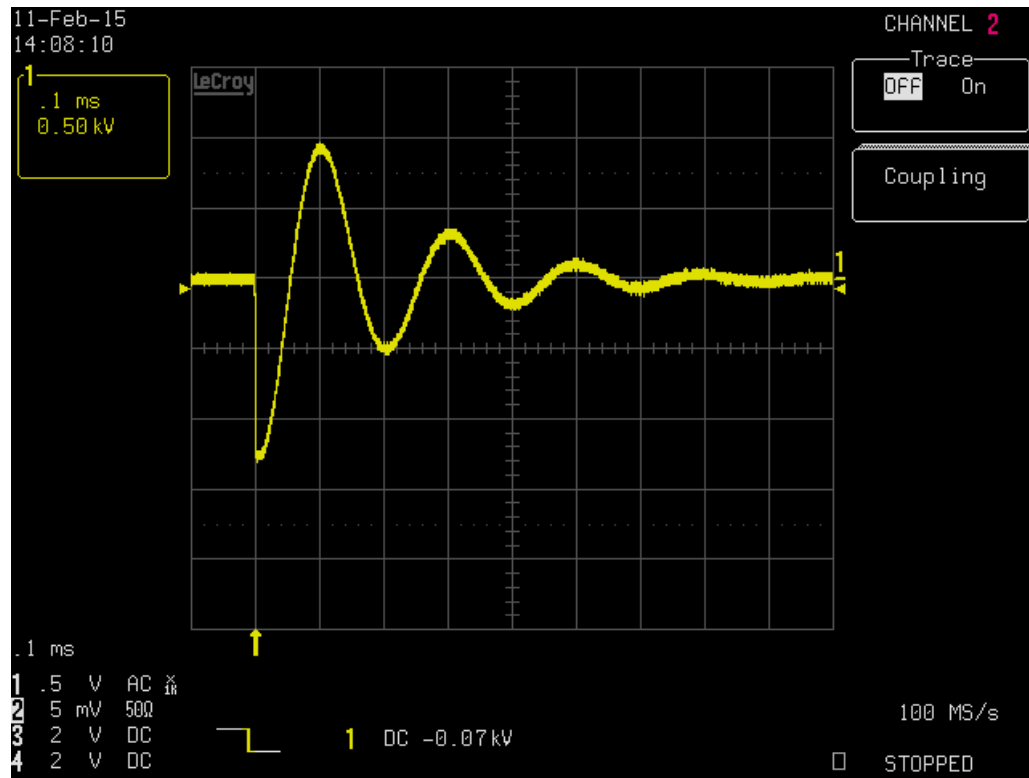
4.21 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 1000 V

Analizando ambos registros se puede observar que tienen los mismos pasos por cero, luego tienes el mismo período (ver figura 4.21 y 4.22). Mientras que en los que se refiere a la tensión, la onda del ensayo individual tiene unos picos más grandes, alrededor de un 34.4%.

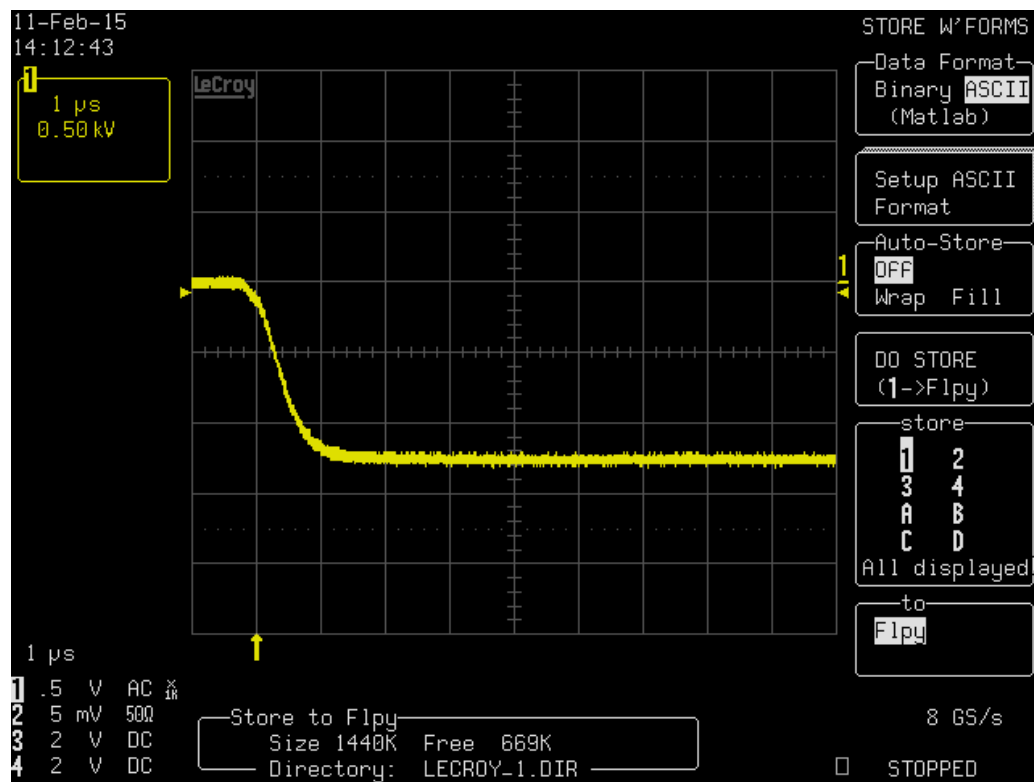


4.22 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 1000 V

Al igual que con el ensayo del motor asíncrono 1, la primera imagen del osciloscopio muestra la magnitud y la duración del impulso aplicado. Después, hay una segunda imagen, con una escala de tiempo inferior para poder resolver bien el tiempo de conmutación, ya que este es demasiado rápido y en la primera imagen no se puede apreciar.



4.23 Oscilograma del transitorio de 1500 V para 0.1 ms/div



4.24 Oscilograma del transitorio de 1500 V para 1 μ s/div

A continuación se muestran los datos y gráfica del osciloscopio:

Tensión de ensayo	1500 V
Tiempo de estabilización	700 μ s
Tensión de pico	1312.50 V
Tensión pico a pico	2281.25 V
Frecuencia de oscilación	4965.949 Hz
Rise time	1.083 μ s

Tabla 16 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio

Si se comparan el ensayo individual y la onda que se representa en el osciloscopio estos son muy similares. Las dos tienen los mismos tiempos entre los pasos por cero mientras en lo que refiere a los pico de tensión el registro del oscilograma es un 14.3% inferior a la del MTC2. Otra diferencia es que la onda del osciloscopio esta invertida.

A continuación se muestra una tabla resumen con todos los resultados de los ensayos sobre el motor 2.

U test [V]	Umtc2 [V]	Up [V]	Upp [V]	Fre_osci [Hz]	Rise time [μ s]
800	763	662,50	1168,75	5.001,43	1,323
1000	995	859,38	1515,63	5001,36	1,482
1500	1530	1312,50	2281,25	4965,949	1,083

Tabla 17 Resultados de los distintos ensayos

Según las mediciones tomadas, se puede observar que la tensión de pico medida es inferior a la tensión del ensayo, aunque esta diferencia es menor cuanto mayor es la tensión. Para el ensayo a 800 V, la tensión de pico es un 17,2% inferior, para la de 1000 V, es un 14% inferior y con 1500 V, se reduce en un 12,5%.

Al estudiar el efecto que produce un incremento en la tensión de consigna sobre la tensión pico a pico se puede observar que, si se incrementa un 20% la tensión la tensión de consigna se produce un incremento del 29.7% en la tensión pico a pico y al aumentar en un 87.5% la tensión de consigna se produce un incremento del 95.2% en la tensión pico a pico.

En cuanto a la frecuencia de oscilación se observa que no varía con la tensión del impulso, ya que la variación se podría despreciar porque es muy pequeña.

Si observamos el *rise time*, no se observa una tendencia significativa.

Como se puede observar, la comparación entre la tensión del ensayo y la tensión del MTC2 es similar a la del motor 1, es decir, en la tensión test es de 1000 V, mientras que en la tensión del MTC2 es 995 V y cuando la tensión test es de 1500 V la tensión del MTC2 es 1530 V (Para impulsos registrados individualmente).

4.3 Ensayo del devanado de baja tensión del transformador

Al igual que con los ensayos de los motores, en este apartado va mostrar los resultados que presenta el equipo MTC2 y el osciloscopio, junto con una descripción de dichos resultados y una comparación entre ellos.

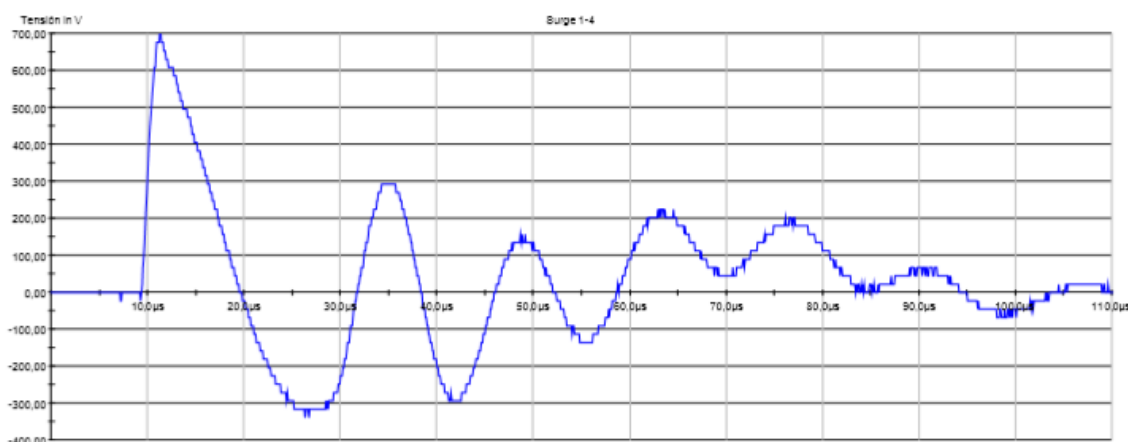
4.3.1 Ensayo a 800 V

Resumen	
Resistance 1-4	72.2 mOhm (18.4°C)
Resistance 2-4	72.2 mOhm (18.5°C)
Resistance 3-4	69.3 mOhm (18.5°C)
Deviation	4.058 %
Surge 1-4	668V, Area diferencial=5.4%, Area=0.1%, Cor.=0.3%, Amortiguación=0.8%, 2.4mH
Surge 2-4	680V, Area diferencial=6.3%, Area=0.6%, Cor.=0.3%, Amortiguación=0.9%, 3.8mH
Surge 3-4	665V, Area diferencial=5.7%, Area=0.5%, Cor.=0.5%, Amortiguación=0.8%, 3.2mH
Compare	675V, Area diferencial=5.3%, Area=0.9%, Cor.=0.9%, Amortiguación=1.3%, 3.3mH
Insulation test	----

Tabla 18 Resumen del ensayo a 800 V

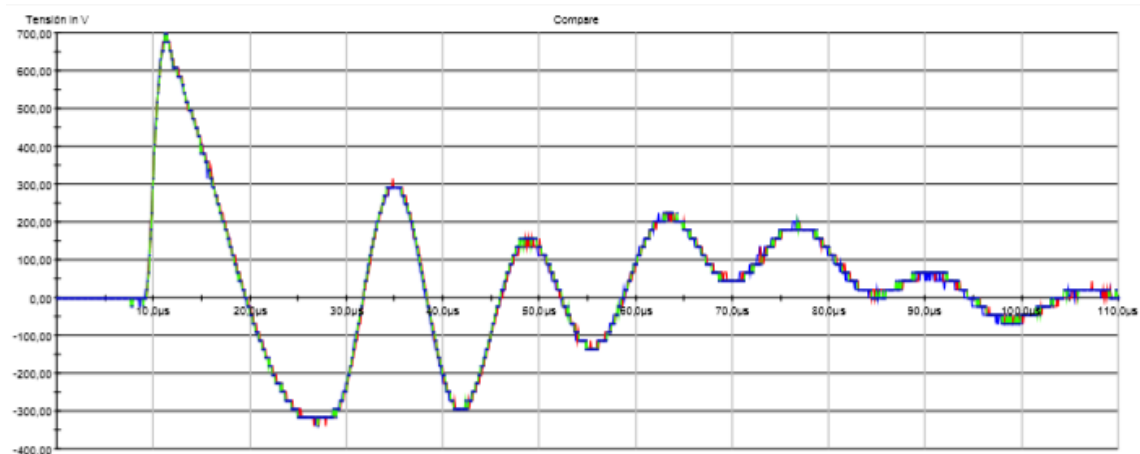
Como se observa en la tabla resumen, la resistencia de los conexiones 1-4 y 2-4, es la misma, mientras que la resistencia 3-4 es ligeramente inferior, siendo la desviación global de 4.058%. Aún así está por debajo del umbral de la norma IEE Std C57.16-1996, que es de un 6%. Mientras que la desviación global de las inductancias es de 44.1%.

En lo que se refiere a la tensión de cresta registrada, no hay gran diferencia. Todas las tensiones están comprendidas entre 665 V del ensayo entre las pinzas 3-4 y 680 V del de 2-4. La superposición de ondas da entender que no hay cortocircuitos entre espiras a esta tensión aplicada.



4.25 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 800 V

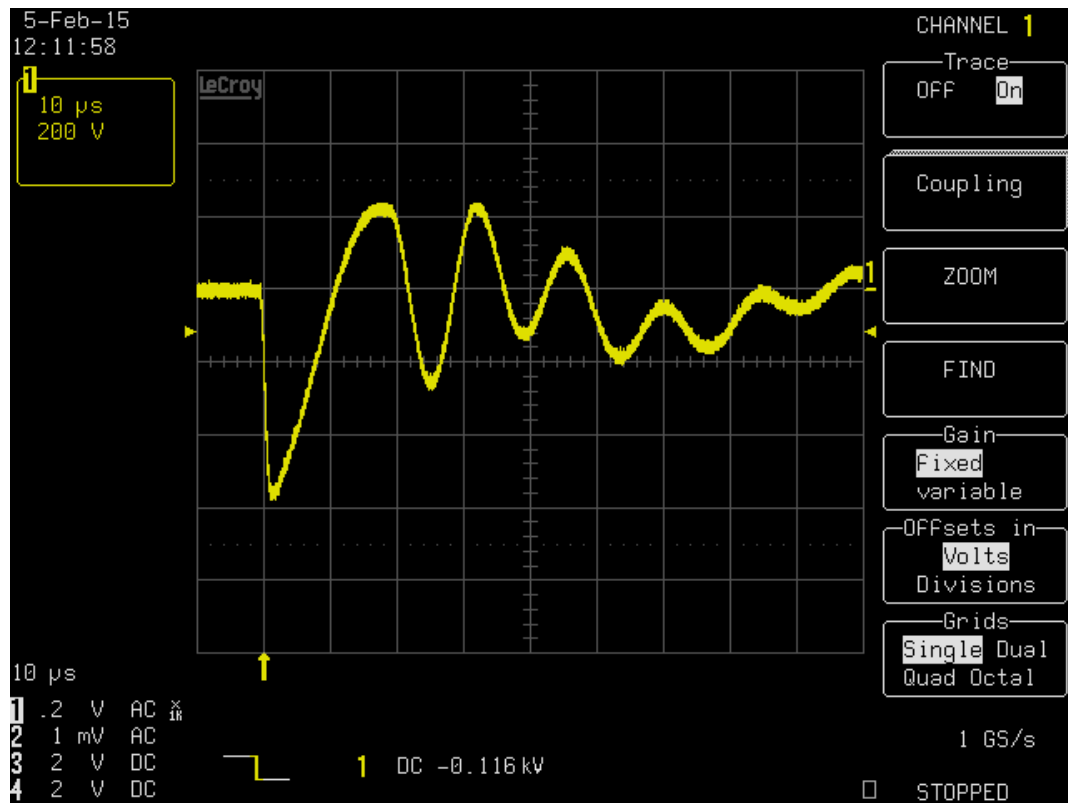
Analizando una onda de un impulso individual y el registro comparativo de las tres fases, se ve que son prácticamente iguales. Tienen las mismas magnitudes de tensiones y tienen el mismo período de oscilación.



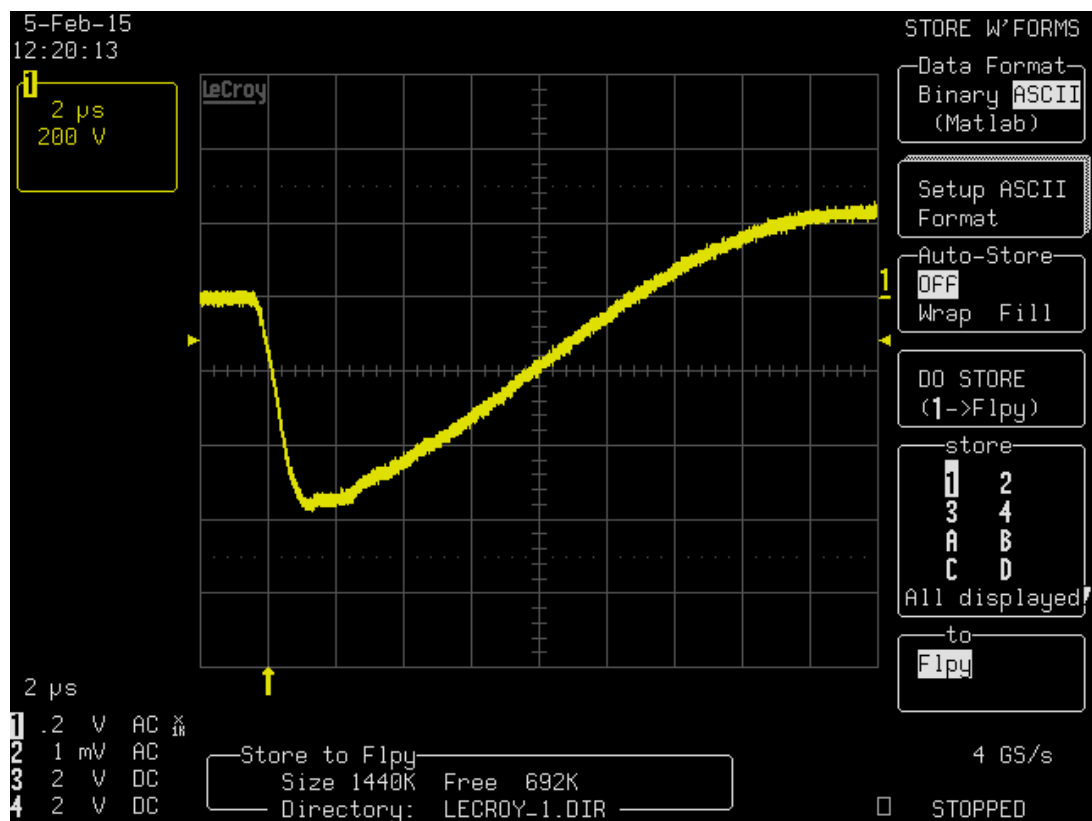
4.26 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 800 V

Como en los caso anteriores al comparar el registro individual y la onda del osciloscopio, se sigue observando que la tensiones de los picos del osciloscopio es un 13% inferior que la del MTC2 y que los tiempos de paso por cero, son los mismos en los dos registros, otra pequeña diferencia es que la onda del osciloscopio esta invertida debido a un cambio de polaridad a realizar la mediciones.

Al igual que en los ensayos de los motores, se tiene dos imágenes del osciloscopio. La primera donde se observa la magnitud y la duración del impulso aplicado y la segunda para observar el *rise time*.



4.27 Oscilograma del transitorio de 800 V para 10 μ s/div



4.28 Oscilograma del transitorio de 800 V para 2 μ s/div

Las características de esta onda son:

Tensión de ensayo	800 V
Tiempo de estabilización	90 μ s
Tensión de pico	581.25 V
Tensión pico a pico	818.75 V
Frecuencia de oscilación	41923.66 Hz
Rise time	1.12 μ s

Tabla 19 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio

4.3.2 Ensayo a 1000 V

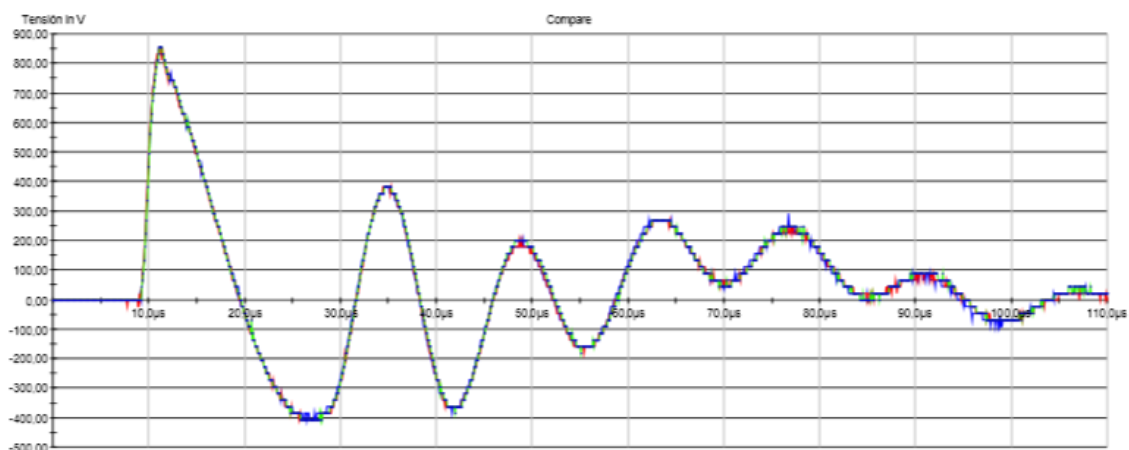
Resumen	
Resistance 1-4	72.2 mOhm (18.4°C)
Resistance 2-4	72.2 mOhm (18.5°C)
Resistance 3-4	69.3 mOhm (18.5°C)
Deviation	4.058 %
Surge 1-4	830V, Area diferencial=3.3%, Area=0.6%, Cor.=0.4%, Amortiguación=0.9%, 3.2mH
Surge 2-4	830V, Area diferencial=4.2%, Area=0.0%, Cor.=0.4%, Amortiguación=0.1%, 3.3mH
Surge 3-4	825V, Area diferencial=4.4%, Area=0.6%, Cor.=0.6%, Amortiguación=0.7%, 3.2mH
Compare	833V, Area diferencial=5.2%, Area=0.9%, Cor.=0.2%, Amortiguación=1.6%, 3.1mH

Tabla 20 Resumen del MTC2 a 1000 V

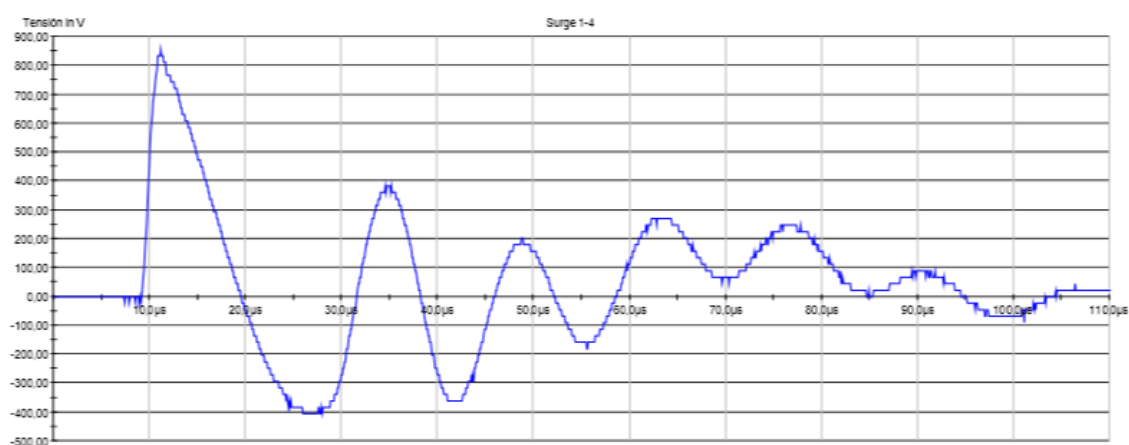
Al ser el mismo motor y como se observa en la tabla resumen la resistencias son las mismas que en el ensayo anterior. En este caso la inductancia no tiene grande desviación ya que es solo de un 6%.

En lo que se refiere a la tensión de cresta registrada, no hay gran diferencia. Todas las tensiones están comprendidas entre 825 V del ensayo entre las pinzas 3-4 y 833 V del ensayo secuencial de las tres fases. La superposición de ondas da entender que no hay cortocircuitos entre espiras a esta tensión aplicada.

Analizando una onda de un impulso individual y el registro comparativo de las tres fases del MTC2, se ve que son prácticamente iguales. Tienes las mismas magnitudes de tensiones y tienen el mismo período de oscilación.



4.29 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 1000 V



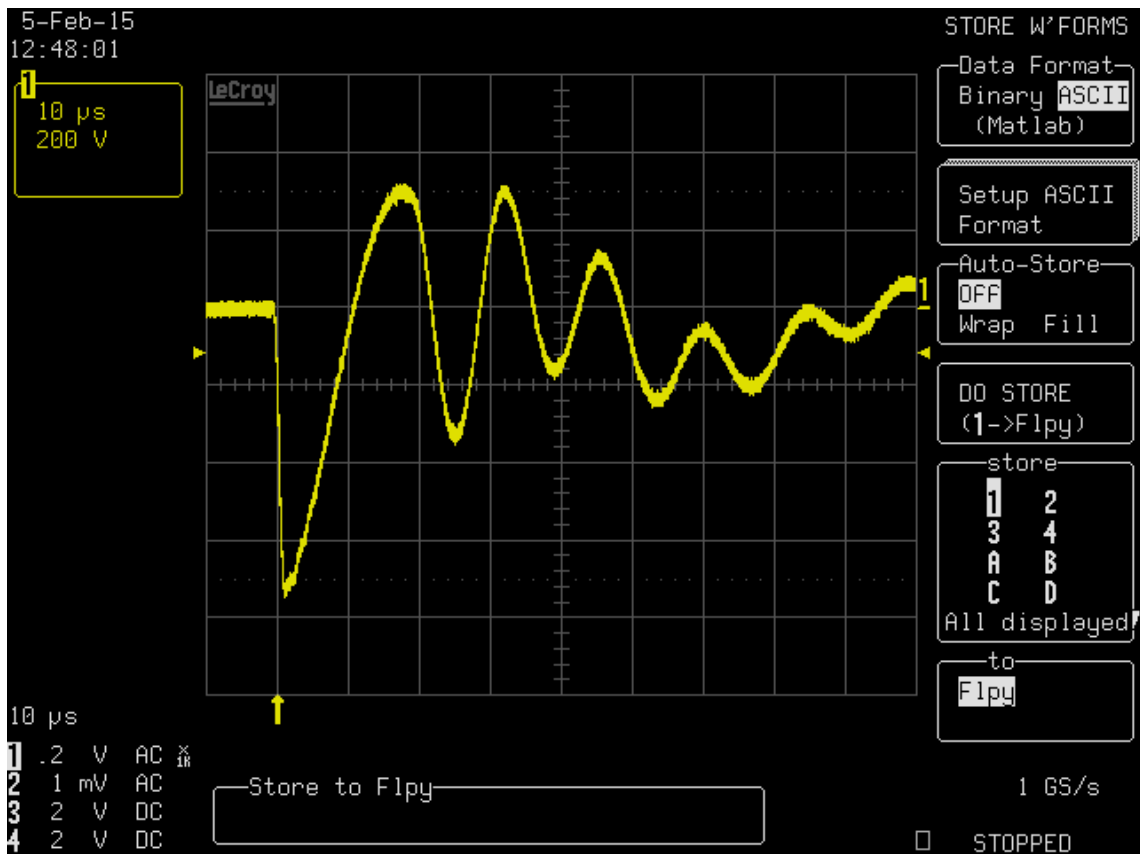
4.30 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 1000 V

Como en los caso anteriores, al comparar el registro individual y la onda del osciloscopio, se sigue observando que la tensiones de los picos del osciloscopio es algo inferior que la del MTC2 en este caso es del 9.6% y que los tiempos de paso por cero son los mismo en los dos registros, otras pequeña diferencia es que la onda del osciloscopio esta invertida debido a un cambio de polaridad al realizar la mediciones.

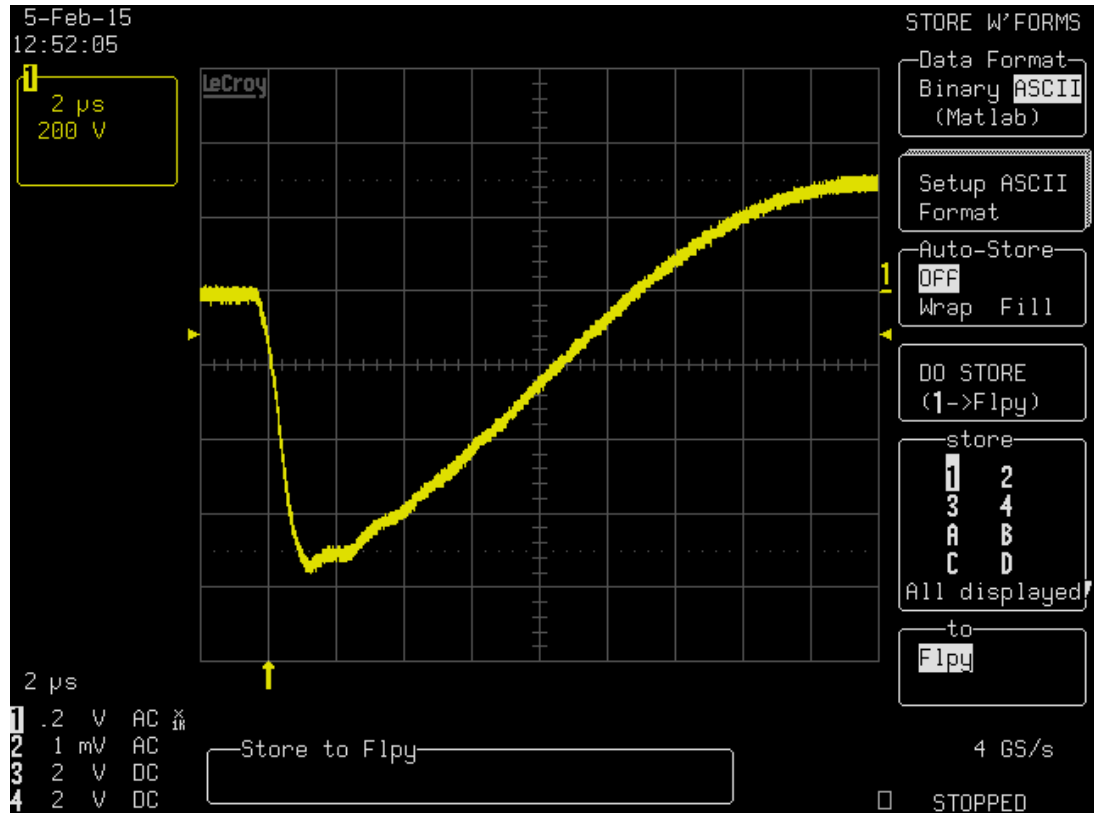
Las características de esta onda son:

Tensión de ensayo	1000 V
Tiempo de estabilización	90 μs
Tensión de pico	750 V
Tensión pico a pico	1068.8 V
Frecuencia de oscilación	42082 Hz
Rise time	1.027 μs

Tabla 21 Parámetros del registro en el osciloscopio



4.31 Oscilograma del transitorio de 1000 V para 10 μ s/div



4.32 Oscilograma del transitorio de 1000 V para 2 μ s/div

4.3.3 Ensayo a 1200 V

Resumen	
Resistance 1-4	72.2 mOhm (18.4°C)
Resistance 2-4	72.2 mOhm (18.5°C)
Resistance 3-4	69.3 mOhm (18.5°C)
Deviation	4.058 %
Surge 1-4	1080V, Area diferencial=3.1%, Area=0.7%, Cor.=0.3%, Amortiguación=1.2%, 3.1mH
Surge 2-4	1053V, Area diferencial=10.2%, Area=3.0%, Cor.=0.2%, Amortiguación=2.9%, 3.2mH
Surge 3-4	1053V, Area diferencial=3.8%, Area=0.1%, Cor.=0.1%, Amortiguación=0.0%, 3.1mH
Compare	1073V, Area diferencial=4.4%, Area=0.6%, Cor.=0.3%, Amortiguación=0.3%, 3.1mH

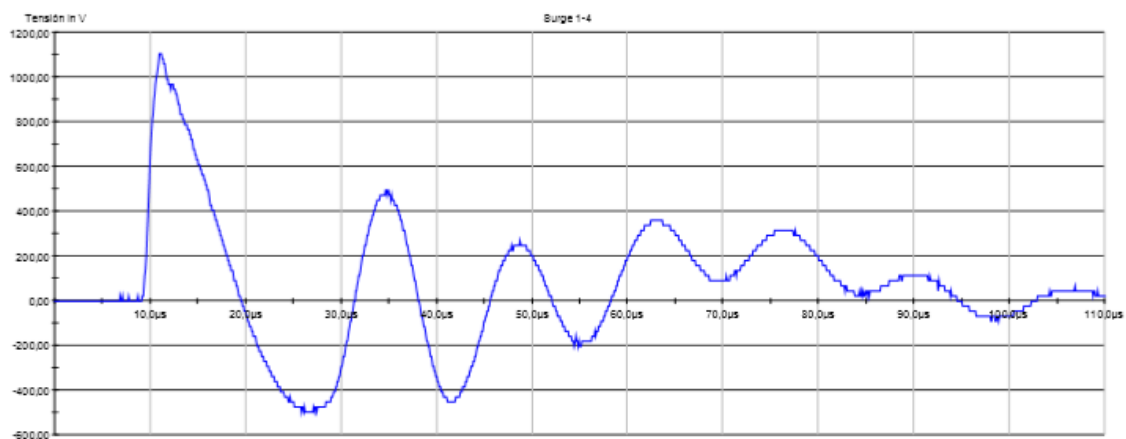
Tabla 22 Resumen del ensayo a 1200 V

Como el motor es el mismo las resistencias son las mismas que en los dos ensayos anteriores. Si se observara la inductancia, se puede comprobar que son muy parecidas ya que solo tiene una desviación de 3.2%.

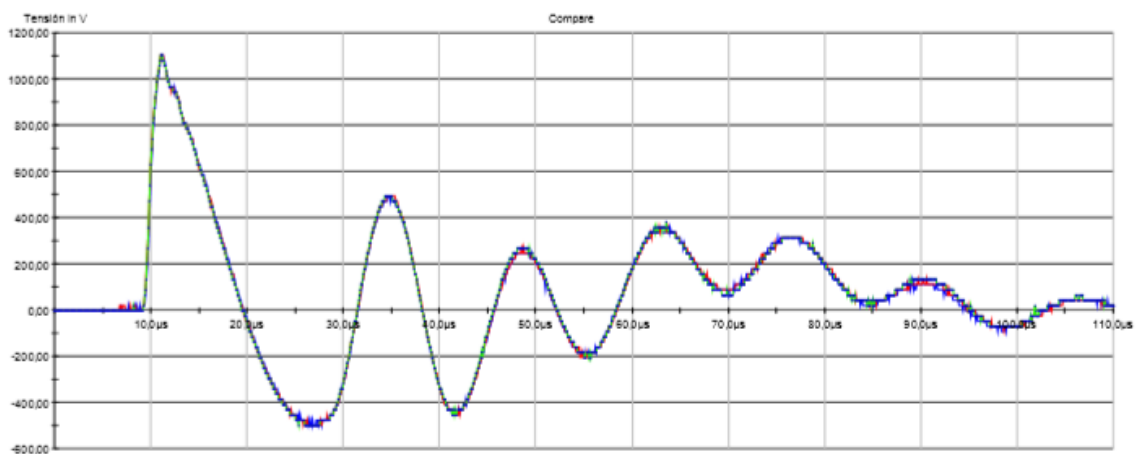
En la tabla se puede apreciar que como en los ensayos individuales y la onda comparativa de las tres fases son muy similares entre sí. Sin embargo, al igual que para 800 V se observa un fenómeno nuevo: la tensión de cresta alcanzada (medida con MTC2) es claramente inferior a la de consigna.

Analizando una onda de un impulso individual y el registro comparativo de las tres fases, se ve que son prácticamente iguales. Tienen las mismas magnitudes de tensiones y tiene el mismo período de oscilación.

Como en los caso anteriores, al comparar el registro individual y la onda del osciloscopio, se sigue observando que la tensiones de los picos del osciloscopio es algo inferior que la del MTC2 en este caso es del 13.7% y que los tiempos de paso por cero son los mismos en los dos registros, otra pequeña diferencia es que la onda del osciloscopio esta invertida debido a un cambio de polaridad al realizar las mediciones.



4.33 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 1200 V

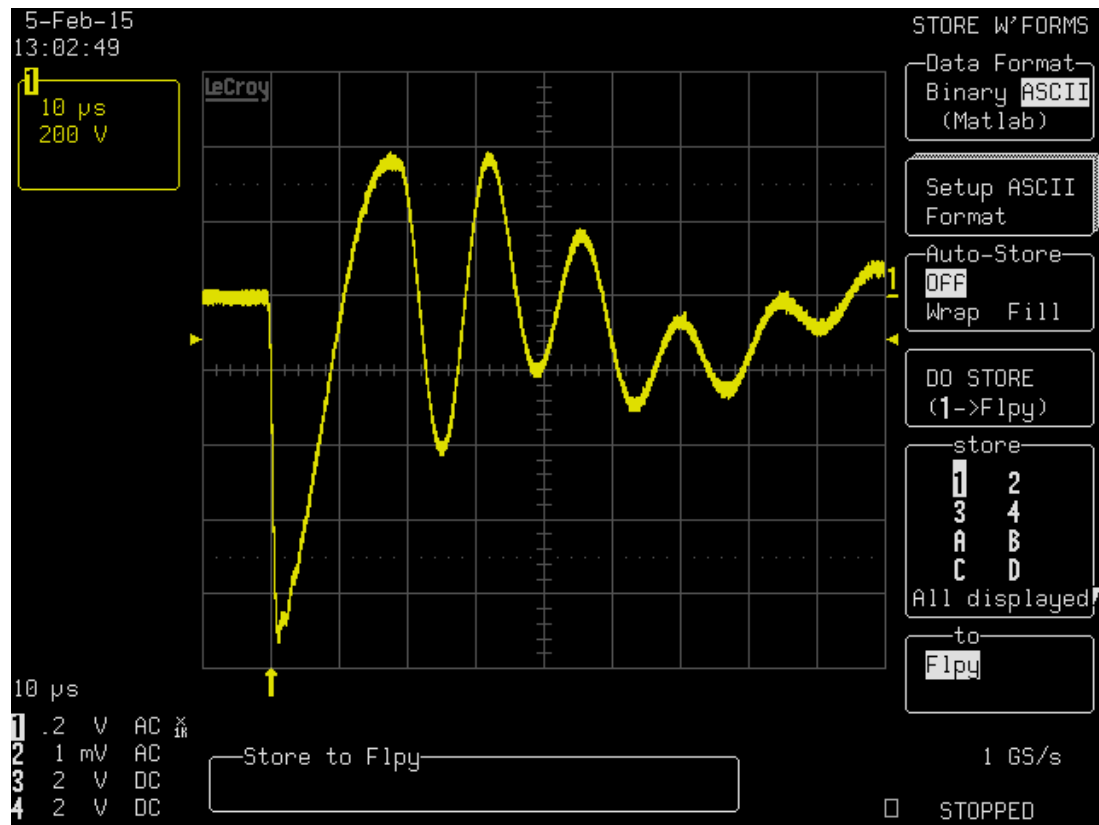


4.34 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 1200 V

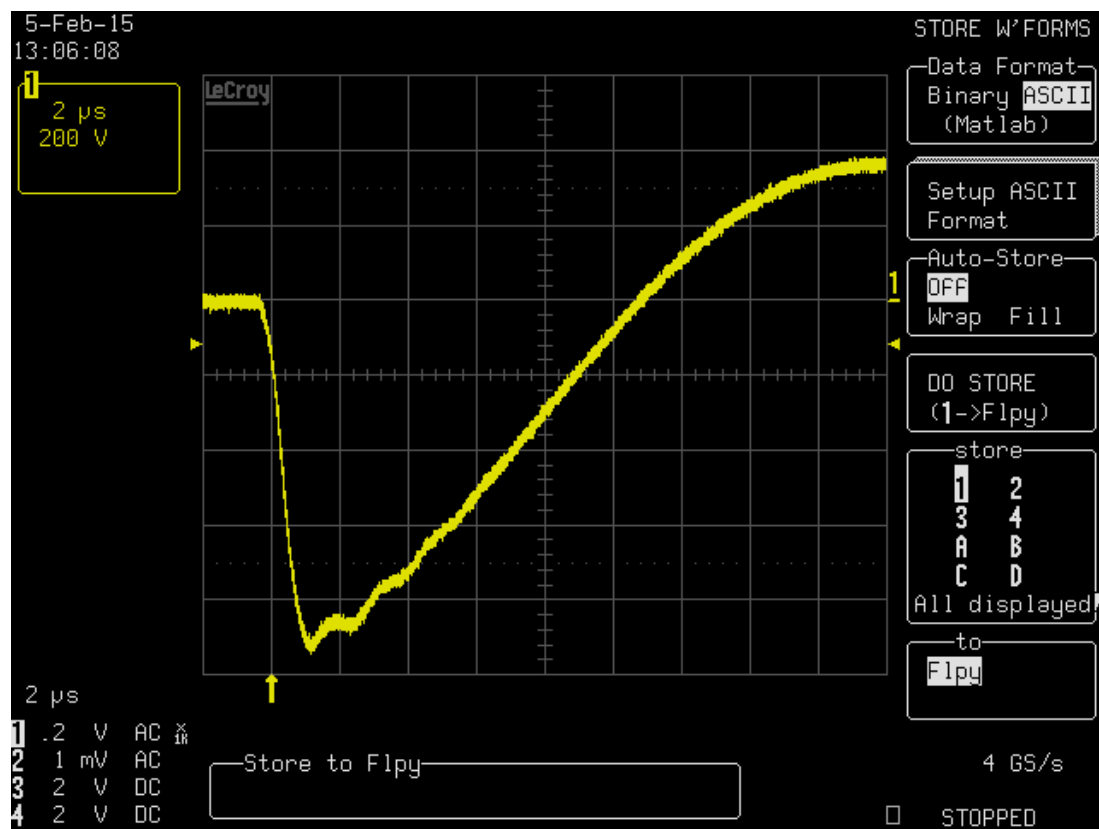
Las características de esta onda son:

Tensión de ensayo	1200 V
Tiempo de estabilización	90 μ s
Tensión de pico	931.25 V
Tensión pico a pico	1318.8 V
Frecuencia de oscilación	41839.31 Hz
Rise time	0.933 μ s

Tabla 23 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio



4.35 Oscilograma del transitorio de 1200 V para 10 μ s/div



4.36 Oscilograma del transitorio de 1200 V para 2 μ s/div

A continuación se muestra una tabla resumen de todos los resultados, para poder comparar entre ellos:

U test [V]	Umtc2 [V]	Up [V]	Upp [V]	Fre_osci [Hz]	Rise time [μ s]
800	668	581,25	818,75	41.923	1,119
1000	830	750	1068,8	42.082	1,027
1200	1080	931,25	1318,8	41.839	0,933

Tabla 24 Resultados de los distintos ensayos

En las imágenes se pueden observar que la onda esta doblemente amortiguada ya que se produce una oscilación y dentro de esa oscilación hay otra.

Con los datos de la tabla resumen elaborados con los resultados del osciloscopio, se puede observar que la tensión de pico es inferior a la tensión del ensayo, pero que esta diferencia es menor cuanto mayor sea la tensión: para 800 V, es un 27.34% inferior, para 1000 V, es un 25% inferior y con 1200 V tensión de pico es 22.4% inferior.

Al estudiar el efecto que produce un incremento en la tensión de consigna sobre la tensión pico a pico se puede observar que, si se incrementa un 20% la tensión la tensión de consigna se produce un incremento del 30.5% en la tensión pico a pico y al aumentar en un 50% la tensión de consigna se produce un incremento del 61.07% en la tensión pico a pico.

En cuanto a la frecuencia de oscilación se observa que, al igual que para los motores, la frecuencia de oscilación no varía con la tensión del impulso.

Con respecto al tiempo de conmutación, en este caso, sí se aprecia una ligera reducción con el aumento de tensión aplicada.

Al comparar la tensión de consigna y la tensión del MTC2 se observar que esta es inferior, ya que cuando las tensiones del test son de 800 V, 1000 V y 1200 V, las tensiones del MTC2 son de 668 V, 830 V y 1080 V respectivamente. Este fenómeno no se apreció en los motores.

4.4 Ensayo del devanado de alta del transformador

Al igual que los ensayos anteriores, se muestran los registros procedentes del MTC2 y del osciloscopio además se mostrarán 3 imágenes del osciloscopio, una para observar la magnitud y la duración del impulso, otra para observar el tiempo de estabilización y por último otra para observar el *rise time*.

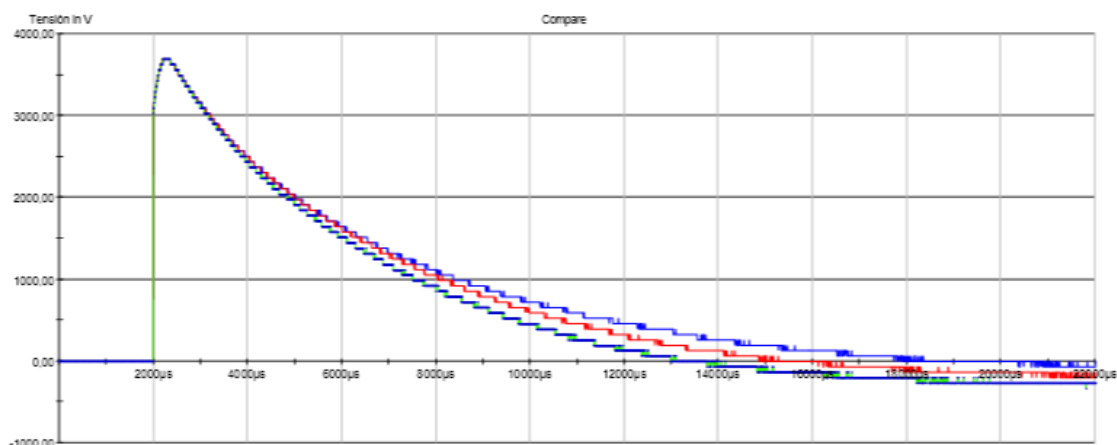
4.4.1 Ensayo a 3000 V

Resumen	
Resistance 1-2	268.975 Ohm (26.4°C)
Resistance 2-3	268.966 Ohm (26.5°C)
Resistance 3-1	268.829 Ohm (26.6°C)
Deviation	0.054 %
Surge 1-2	3688V, Area diferencial=10.2%, Area=5.0%, Cor.=0.9%, Amortiguación=4.6%, 0.0H
Surge 2-3	3680V, Area diferencial=10.1%, Area=4.8%, Cor.=1.2%, Amortiguación=3.2%, 0.0H
Surge 3-1	3688V, Area diferencial=27.2%, Area=8.4%, Cor.=1.1%, Amortiguación=9.6%, 0.0H
Compare	3688V, Area diferencial=25.1%, Area=7.5%, Cor.=0.6%, Amortiguación=8.8%, 0.0H

Tabla 25 Resumen del MTC2 a 3000 V

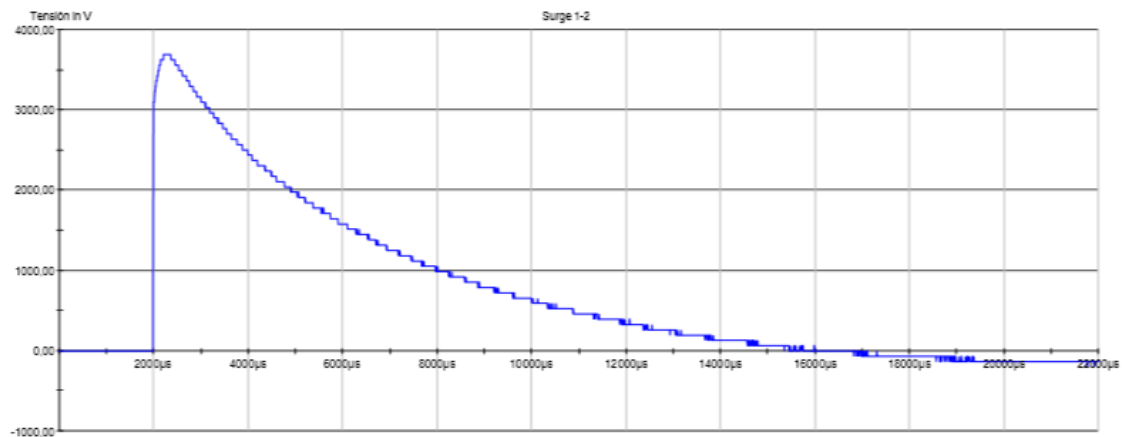
Al realizar este ensayo, se observa que las resistencias de cada fase son las mismas, puesto que tiene un valor de 0.054% de desviación, este valor es el más bajo de los ensayos anteriores. También, si observamos la inductancia se aprecia un efecto que anteriormente no se daba, todas las inductancias son 0 H.

Otra observación que se puede apreciar en la tabla, es como los ensayos individuales y la onda comparativa de las tres fases tienen una tensión muy parecida con solo una desviación del 2.1%. Sin embargo, a diferencia de los ensayos anteriores se observa un fenómeno nuevo: la tensión de cresta alcanzada (medida con MTC2) es claramente superior a la de consigna.



4.37 Registro en MTC 2 del ensayo secuencial (3 fases) a 3000 V

Como se puede observar en el imagen 4.36 (donde se muestra el registro de las tres fases), en el franco de subida de las tres fases no se aprecia ninguna diferencia, mientras que en el franco de baja, se observa una pequeña diferencia entre las bajadas de tensiones de cada fase. Por lo demás las ondas son practicamente iguales.



4.38 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 3000 V

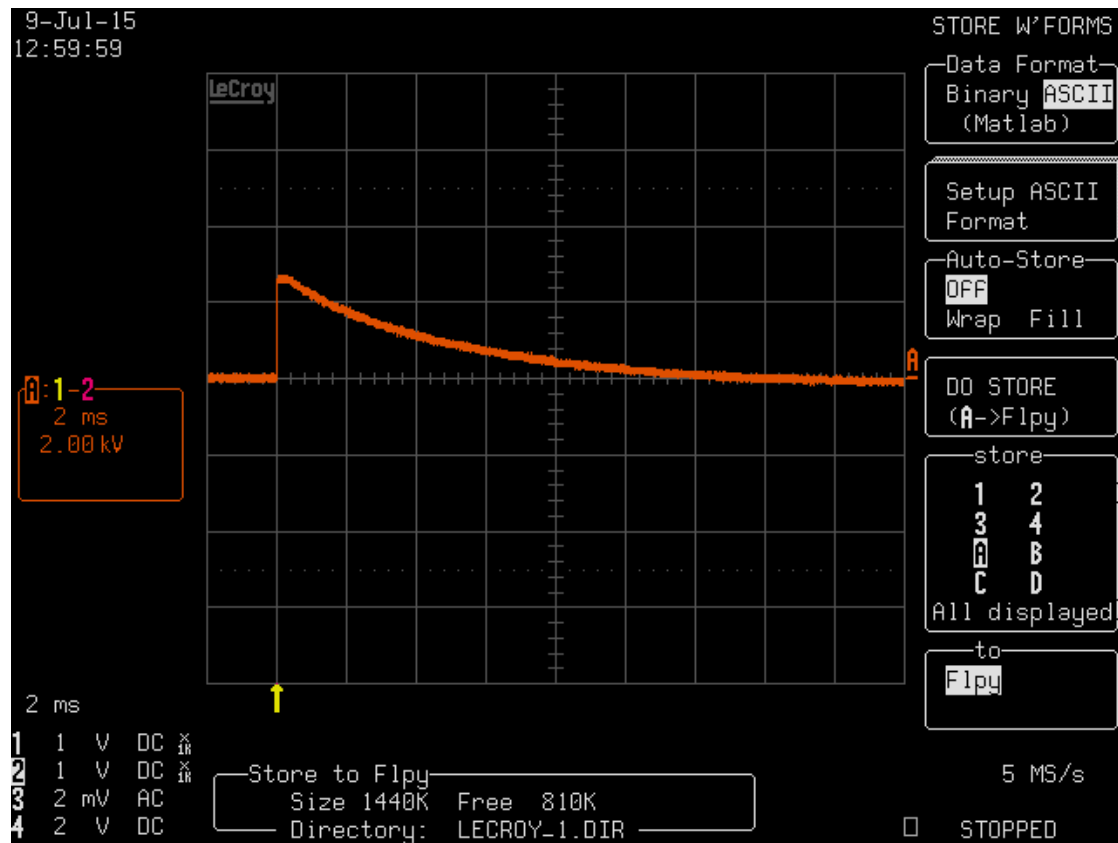
Al comparar el registro individual y la onda del osciloscopio, se observa que la tensión de pico del osciloscopio es inferior que en la tensión del MTC2, en este caso la diferencia es del 26,3%, esta diferencia es considerablemente mayor que en los ensayos anteriores.

En este ensayo se ha decidido tomar tres registros en el osciloscopio. El primer registro muestra el pico de tensión y tiene una escala de 2 ms por división, en el segundo con una escala de 10 ms por división, se utiliza para poder calcular con exactitud el tiempo de estabilización, ya que en el primer registro la escala es demasiada pequeña para poder calcularla y el último registro a 0.5 µs el cual se utiliza para calcular el *rise time*.

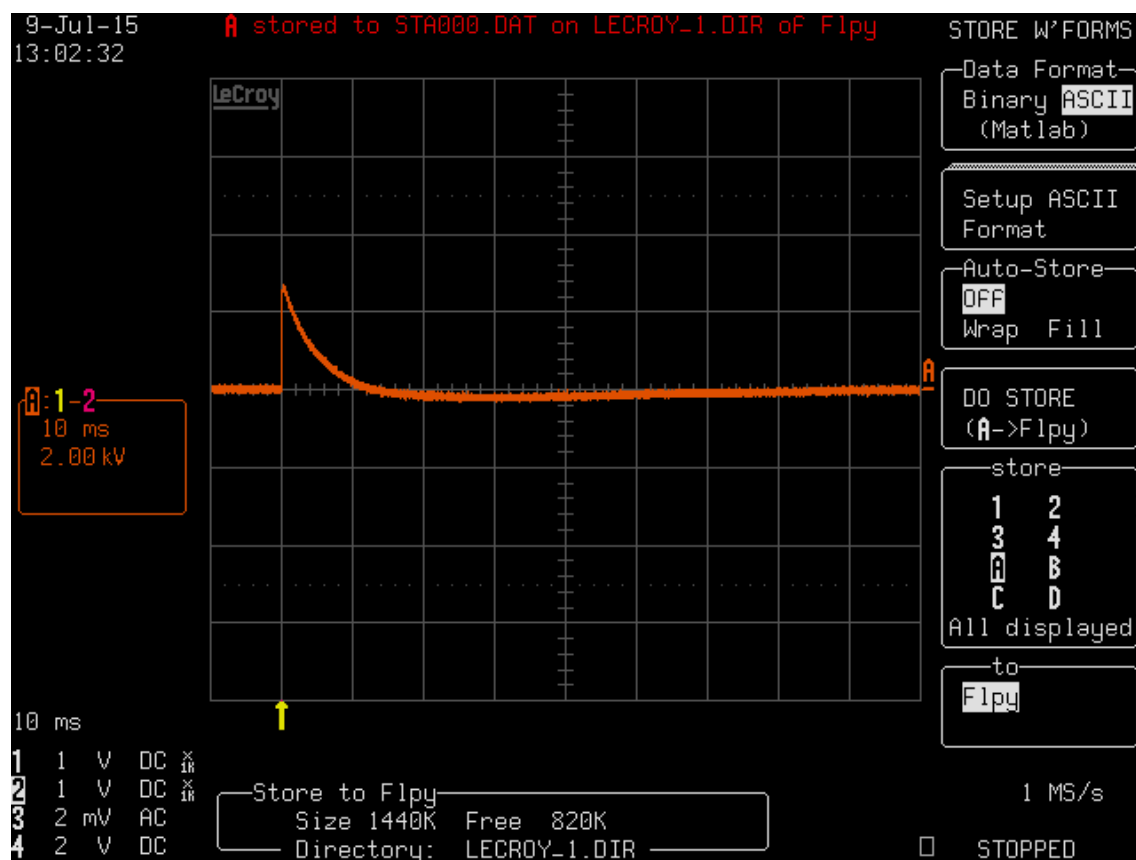
Las características de esta onda son:

Tensión de ensayo	3000 V
Tiempo de estabilización	60.14 ms
Tensión de pico	2718,75 V
Tensión pico a pico	2937.50 V
Frecuencia de oscilación	No oscila
Rise time	6.69 µs

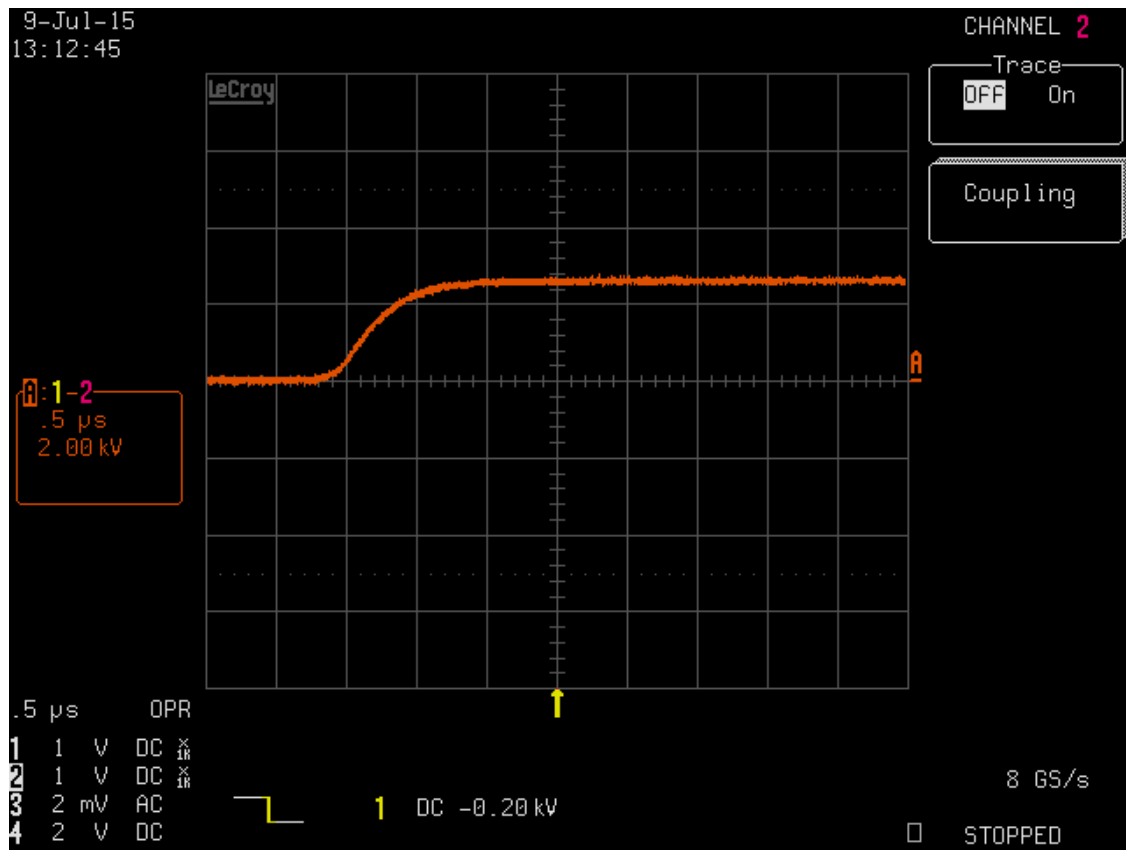
Tabla 26 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio



4.39 Oscilograma del transitorio de 3000 V para 2 ms/div



4.40 Oscilograma del transitorio de 3000 V para 10 ms/div



4.41 Oscilograma del transitorio de 3000 V para 0.5 μ s/div

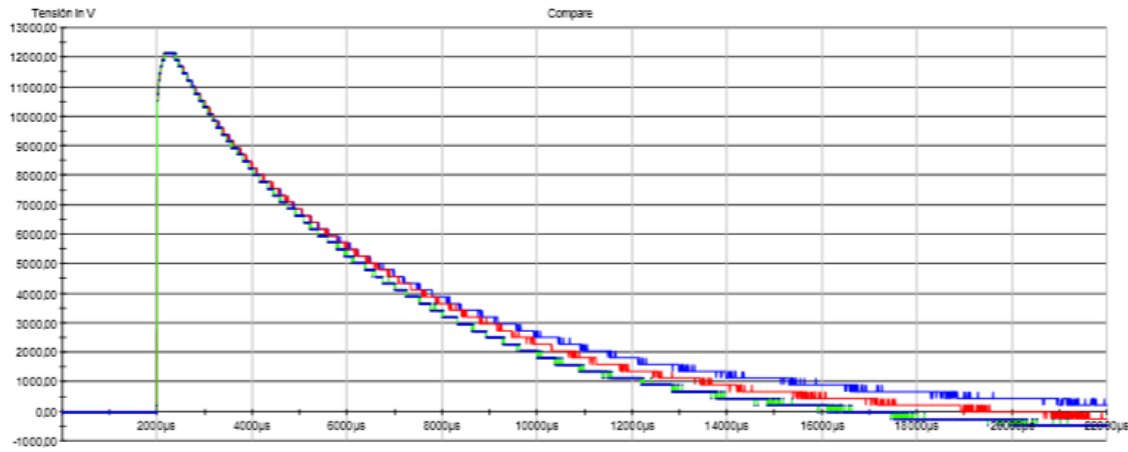
4.4.2 Ensayo a 10000 V:

Resumen	
Resistance 1-2	268.975 Ohm (26.4°C)
Resistance 2-3	268.966 Ohm (26.5°C)
Resistance 3-1	268.829 Ohm (26.6°C)
Deviation	0.054 %
Surge 1-2	12142V, Area diferencial=1.3%, Area=0.1%, Cor.=0.3%, Amortiguación=0.1%, 0.0H
Surge 2-3	12142V, Area diferencial=2.7%, Area=0.4%, Cor.=1.1%, Amortiguación=1.8%, 0.0H
Surge 3-1	12142V, Area diferencial=11.4%, Area=4.0%, Cor.=1.4%, Amortiguación=4.4%, 0.0H
Compare	12142V, Area diferencial=18.3%, Area=13.9%, Cor.=1.0%, Amortiguación=8.6%, 0.0H

Tabla 27 Resumen del MTC2 a 10000 V

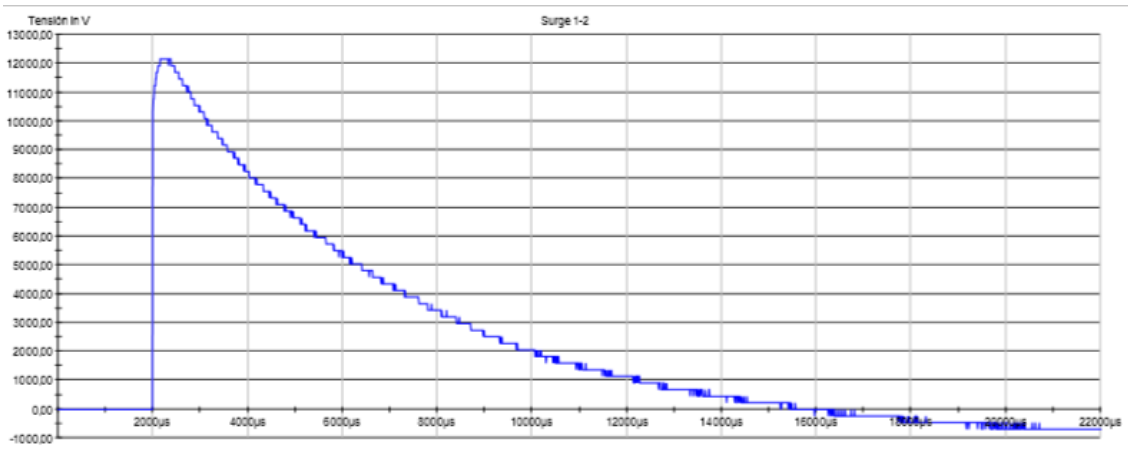
Al ser el mismo transformador las resistencias son las mismas que en el ensayo anterior, de igual forma pasa con las inductancias que son igual a 0.

Comparando los registros individuales de cada fase y el registro comparativo se observa como las tensiones son idénticas en los 4 casos. Sin embargo, al igual que en el ensayo a 3000 V la tensión de cresta alcanzada (medida con MTC2) es claramente superior a la de consigna.



4.42 Registro en MTC2 del ensayo secuencial (3 fases) a 10000 V

Como se puede observar en el imagen 4.41 (donde se muestra el registro de las tres fase), en el franco de subida de las tres fase no se aprecia ninguna diferencia, mientras en el franco de baja se observa una pequeña diferencia entre las bajadas de tensiones de cada fase. Por lo demás las onda son practicamente iguales.



4.43 Registro en MTC2 del ensayo individual (1 fase) a 10000 V

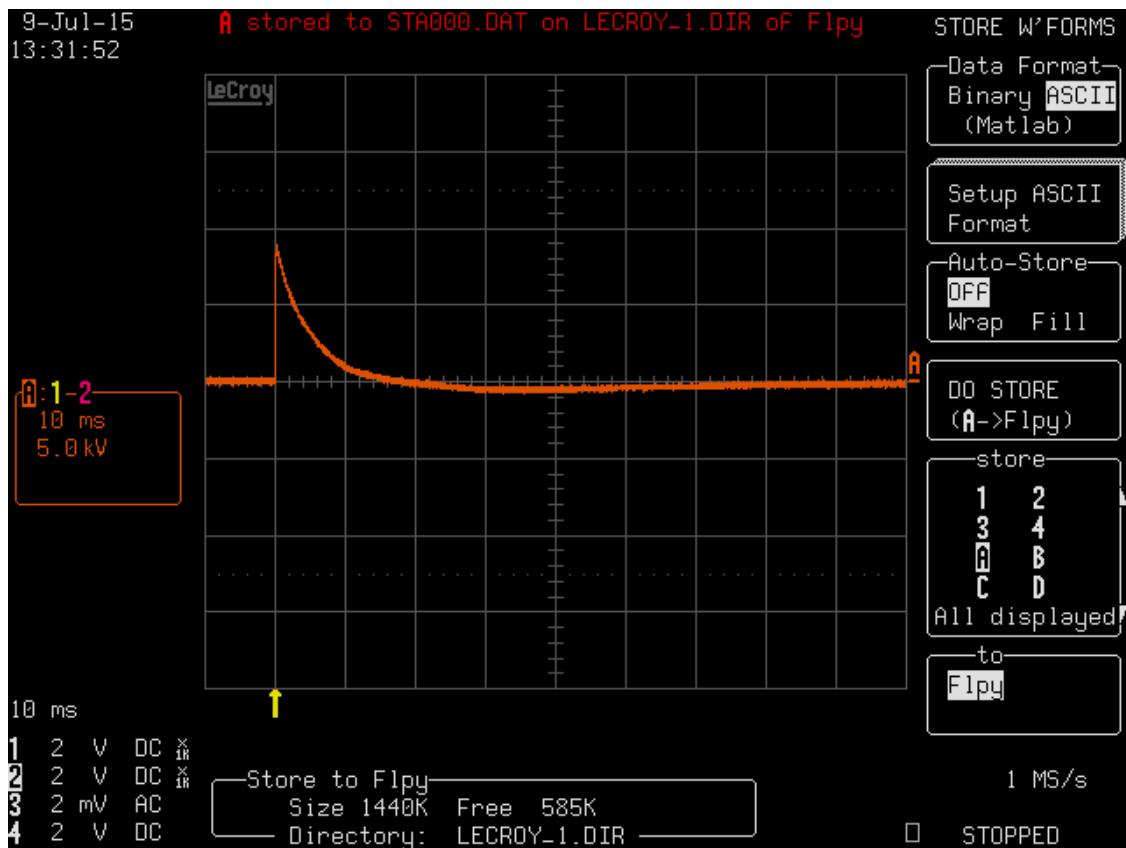
Al comparar el registro individual y la onda del osciloscopio, se observa que la tensión de pico del osciloscopio es inferior que en la tensión del MTC2, en este caso la diferencia es del 25.88%.

Las características de esta onda son:

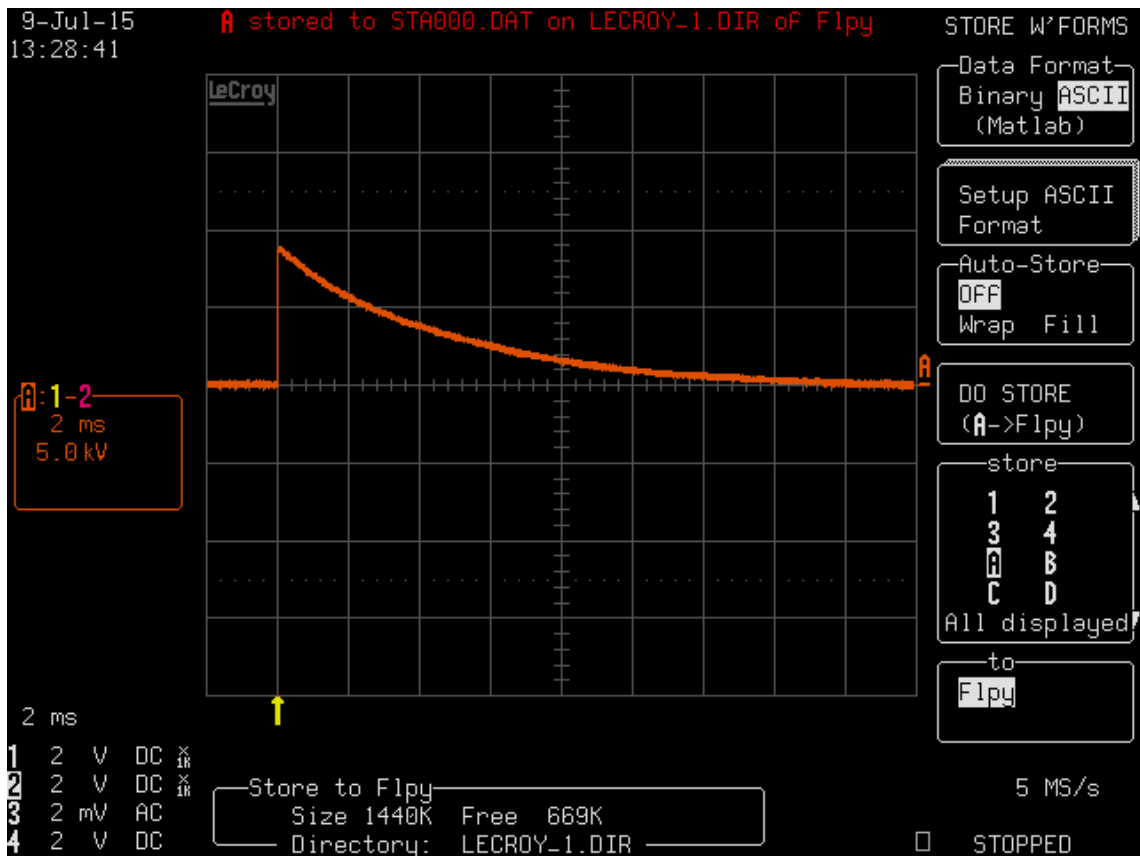
Tensión de ensayo	10000 V
Tiempo de estabilización	21.17 ms
Tensión de pico	8999,63 V
Tensión pico a pico	9311,5 V
Frecuencia de oscilación	No oscila
Rise time	4.69 μ s

Tabla 28 Parámetros calculados del registro en el osciloscopio

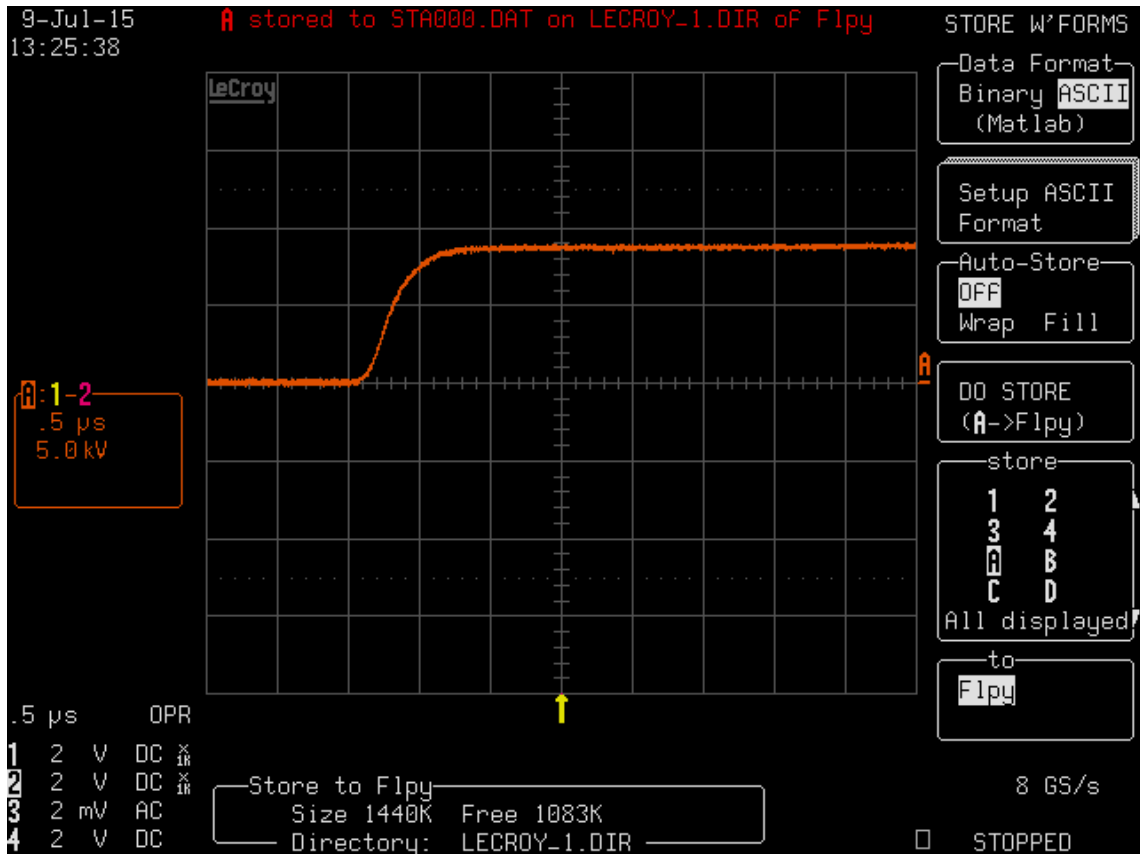
Al igual que en el ensayo anterior se va a realizar tres registros en el osciloscopio con diferente escala de tiempo.



4.44 Oscilograma del transitorio de 10000 V para 10 ms/div



4.45 Oscilograma del transitorio de 10000 V para 2 ms/div



4.46 Oscilograma del transitorio de 10000 V para 0.5 μ s/div

A continuación se muestra una tabla resumen con todos los resultados:

U test [V]	Umtc2 [V]	Up [V]	Upp [V]	Fre_osci [Hz]	Rise time [μ s]
3000	3688	2718.25	2937.5	-	6.69
10000	12142	8999.6	9311.5	-	4.69

Tabla 29 Resultados de los distintos ensayos

En los ensayos de alta tensión del transformador a diferencia de los otros, no existen oscilaciones. La forma de onda de este ensayo es un pico de tensión donde baja exponencialmente hasta valores negativos muy pequeños, posteriormente sube hasta cero para estabilizarse.

En la tabla resumen, se puede observar que la tensión de pico es ligeramente inferior a la tensión del ensayo, para la tensión de ensayo de 3000 V, la tensión de pico es un 9.4% inferior y para 10000 V, la tensión de pico es un 10% inferior.

Al estudiar el efecto que produce un incremento en la tensión de consigna sobre la tensión pico a pico se puede observar que, si se incrementa un 333% la tensión de consigna, se produce un incremento del 331% en la tensión pico a pico.

En cuanto a la frecuencia de oscilación, al no haber oscilaciones no existe.

Si observamos el *rise time*, se observa que a mayor tensión menor es el *rise time*, puesto que con una tensión de 3000 V el *rise time* es de 6.69 μ s mientras con 10000 V es de 4.69 μ s.

4.5 Comparación de resultados entre todas las máquinas

En lo que se refiere a la forma de onda en cada elemento (que depende fuertemente de la impedancia de carga sobre la que se aplica el transitorio) es claro que cada equipo tiene su propia forma de onda, aunque en los motores son muy parecidas entre sí. En cuanto a la onda del devanado de baja del transformador, es parecida a la de los motores, pero no sigue una forma amortiguada perfectamente sinusoidal porque la onda no llega a pasar por el cero en su atenuación; parece que hubiera dos sinusoides superpuestas, (lo que puede deberse a la presencia de dos modos resonantes). En la onda del devanado de alta del transformador, tiene el pico del impulso, posteriormente disminuye de forma exponencial hasta una pequeña oscilación de polaridad opuesta al pico del impulso que acaba por estabilizar la onda. Otra diferencia que se puede apreciar en las imágenes es cómo varía el tiempo de estabilización de cada onda. Se observa que la onda que más tarda en estabilizarse es la onda del ensayo del devanado de alta del transformador, con unos tiempos de 21,17 ms en el

ensayo de 10000 V y con 60,14 ms a 3000 V. Las siguientes ondas menos amortiguadas son las de los motores, donde su tiempo de estabilización comprende entre los 500 μ s del primer motor y los 700 μ s del segundo motor y por último la onda menos amortiguada es la onda del devanado de baja del transformador con un tiempo de alrededor de 90 μ s. Con lo descrito anteriormente se puede concluir que cada tipo de máquina tiene su propio tiempo de estabilización independientemente de la tensión que se le aplique. Aunque en el devanado de alta tensión no suceda este fenómeno, esto puede ser debido a que el $\pm 10\%$ de la tensión de pico (cuando la tensión es inferior del $\pm 10\%$ de la tensión de pico se considera que la onda está estabilizada) está muy próximo al mínimo de la onda, en el caso de 10000 V el mínimo se encuentra ya dentro del $\pm 10\%$, luego ya está estabilizado, mientras en el caso de 3000 V el mínimo de la onda se encuentra fuera del $\pm 10\%$ luego la onda se estabilizará después del mínimo.

En lo que se refiere al *rise time* en el devanado de baja y en los dos motores son muy parecidos, (alrededor de 1 μ s), mientras en el ensayo del devanado de alta se puede observar que el *rise time* es superior entre 6.69 μ s y 4.69 μ s. Una vez que conocemos el *rise time* y según la norma IEE std 522 se puede determinar la tensión de ensayo de los motores. La tensión del ensayo para los motores sería 1500 V de tensión en la cual podrían observarse fallos en el aislamiento, también se debe realizar un ensayo a 800 V, que es una tensión inferior a la tensión que puede dañar el equipo, para posteriormente poder compararlas. Como no hay una norma para el ensayo del bobinado del transformador, se deberá hacer una equivalencia con la norma IEEE Std 522, se tomara una tensión de impulso en el lado de baja de 1200 V y posteriormente de 800 V para compararla y en el devanado de alta se utilizará 3000 V y 10000 V

En lo que se refiere a la frecuencia de oscilación hay diferencias entre todos los elementos, puesto que cada elemento tiene diferentes inductancias y la frecuencia de oscilación depende de la inductancia (L menor, f resonancia mayor). En el motor 2 con 94.3 mH la frecuencia de oscilación es cercana a 5000 Hz, en el motor 1 con una inductancia de 51 mH la frecuencia es de unos 6800 Hz y en el devanado de baja del transformador al tener una inductancia de 2.4 mH la frecuencia de oscilación se incrementa hasta unos 42000 Hz. Mientras que en el devanado de alta tensión al no poseer inductancia no hay oscilaciones luego no tiene frecuencia de oscilación.

En lo que respecta a la tensión de pico del impulso de los motores y del transformador, se observa que es inferior a la tensión de ensayo.

En la tensión pico a pico de los transitorios, podemos observar que en el transformador, es parecida a la tensión de ensayo, en el devanado de baja esta ligeramente por encima, mientras que en el devanado de alta esta ligeramente por debajo, mientras en los motores se observa que hay una mayor diferencia entre la tensión de pico a pico y la tensión de ensayo.

5 Conclusiones

Con este trabajo he querido explicar y simplificar los pasos a seguir para realizar un ensayo de onda de choque ("*surge test*") correctamente con el equipo que existe en el laboratorio de investigación y ensayos en alta tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III de Madrid.

Para alcanzar este objetivo he realizado una revisión bibliográfica sobre los sistemas de aislamiento de máquinas rotativas y los problemas que aparecen en los mismos por la aparición de nuevos fenómenos transitorios, fruto del uso de inversores. Posteriormente he explicado los métodos y pautas a seguir para realizar el surge test según la guía IEEE std 522-1992.

Ésta sugiere diferentes métodos, niveles de ensayos y los procedimientos para realizar dicho ensayos en bobinas, estatores y máquinas completas. Todos estos aspectos pueden ser modificados dependiendo el acuerdo al que lleguen el cliente y el proveedor.

Según los datos obtenidos en los ensayos, la forma de onda de la tensión cambiará para cada tipo de devanado. De todas formas, aunque el tiempo de estabilización de las ondas y sus frecuencias de oscilación cambien, los tiempos de conmutación son muy similares, dando valores en torno a 1 μ s. Este último resultado posee gran importancia, porque implica que los ensayos de onda de choque realizados con este equipo no se puede hacer al nivel de tensión que se suponía ($3.5 \cdot V_1$ para 100 ns de tiempo de conmutación), sino $5 \cdot V_1$, si se quiere cumplir con la recomendación del estándar IEEE.

La buena calibración de los equipos, es otro de los elementos a tener en cuenta. En el caso de este trabajo, existe una diferencia de medida en las tensiones de cresta entre el MTC2 y el osciloscopio. Esta diferencia en los motores y en el devanado de baja tensión del transformador, es un 12% menor en el osciloscopio, mientras que, en el devanado de alta, esta diferencia es mayor siendo un 26% menor en el osciloscopio. Por no olvidar, que hay que tener en cuenta que el propio MTC2 tiene una pequeña diferencia entre la tensión de consigna y la tensión que produce el MTC2.

Tras la realización del este proyecto he aprendido como es el aislamiento de la máquinas rotativas y que propiedades deben tener los materiales utilizados. También, me he familiarizado con normas y nomenclatura específica sobre las máquinas rotativas en inglés. He aprendido a utilizar un *surge test* y he incrementado mi capacidad de utilizar el osciloscopio. Y por último destacar los conocimientos adquiridos sobre tratamiento de ondas, como el "*rise time*", la frecuencia de oscilación y el tiempo de estabilización de una onda. Aunque ya lo conocía, nunca había trabajado con ellos.

6 Presupuesto

A continuación se va a proceder a realizar una aproximación de los costes generados durante la realización de este proyecto. Teniendo en cuenta, solo los costes personales, puesto que no hay costes materiales debido a que el laboratorio de investigación y ensayos en alta tensión (LINEALT) de la universidad Carlos III de Madrid, ha cedido los materiales (MTC2, osciloscopio, motores y transformador) necesarios para la realización de dicho proyecto, porque la compra del material necesario para dicho proyecto sería incoherente por el alto valor que tienen los equipos.

Partiremos de un presupuesto que se acerque a la realidad laboral actual. Teniendo en cuenta el personal utilizado para realizar este proyecto, pasará a citar el presupuesto que se utiliza en cada uno. En el caso del ingeniero junior, este debería recibir alrededor de 25€/hora, lo que produce un coste de 10.000€ tras las 400 horas dedicadas. El técnico de laboratorio, que superviso el ensayo en el laboratorio, debería recibir 30€/hora, tras las 15 horas trabajadas, produciría un coste de 450€ y por último, el jefe de proyecto producirá un coste de 1.800€ tras alrededor 30 horas dedicadas a 60€/hora.

Personal	Horas dedicadas	€/hora	coste
Ingeniero Junior	400	25	10.000 €
técnico del laboratorio	15	30	450 €
Jefe de proyecto	30	60	1.800 €
		Subtotal	12.250 €
		IVA (21%)	2.573 €
		TOTAL	14.823 €

Tabla 30 Presupuesto

El coste total del ensayo asciende a catorce mil ochocientos veintitrés euros



7 Bibliografía

Blaquez, A. S. (2010). *Monotorización continua de descargas parciales para caracterización de sistemas de aislamiento en máquinas eléctricas*. Leganes: Proyecto de fin de Carrera en la Universidad Carlos III de Madrid.

Kuffel. (2000). *High voltage engineering: fundamentols*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

LINEALT. *Instrucción Técnicas para el diagnóstico de motores con el MTC2*.

Stone, G. (oct 2003). *Electrical insulation for rotating*. Piscataway: IEEE Press Editorial.

Weg. *Guia tecnica Motores de inducción Alimentado por convertidores PWM*.

Guide for Testing Turn-to-Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Rotating Electric Machines"; IEEE Std. 522. IEEE Power Engineering Society; 1992.

Universidad de Oviedo, *La Máquina asíncrona*, Dpo. De ingeniería Eléctrica, Electrónica de Computadores y Sistema.

http://www.uib.cat/depart/dfs/GTE/education/industrial/con_maq_electriques/teoria/Teoria%20Oviedo/Segundo%20Parcial/Presentaciones%20en%20formato%20PDF/Te ma7.pdf

UNE-EN 60071-1. *Coordinación de aislamiento*. 1997

8 ANEXO 1

Medidas de seguridad que se tomaron médiante la realización del los ensayos

Estos equipos están concebidos para su uso bajo la atención de un personal cualificado, el cual debería estar familiarizado con las precauciones necesarias para evitar posibles accidentes.

Durante la utilización de este equipo hay situaciones que pueden suponer un peligro para la salud y la vida de las personas. En los casos indicados más adelante, se debe prestar una especial atención, no solo al operario, sino que también al resto de personas que puedan ser susceptibles a sufrir un accidente, por lo que se deben transmitir las medidas de seguridad necesarias a todo el equipo.

En general, hay que partir del supuesto de que siempre existe peligro durante un ensayo eléctrico. El usuario tiene que tener constancia de ello, y debe recibir esta información siempre de los responsables del equipo.

Algunas de las medidas generales de seguridad son las siguientes:

- Cuando no haya tensión aplicada, pero no se observa que los aparatos estén puestos a tierra por un cable bien visible, no permitir la entrada de nadie en la zona de ensayos.
- Evitar trabajar bajo tensión en cualquier equipo.
- Evitar trabajar solo.
- No permitir la utilización de cualquier equipo que se encuentre dañado.
- Comprobar la correcta conexión de tierra en todos los equipos y en todo el circuito.
- Comprobar que todas las conexiones de tierra deben estar unidas entre sí.
- En el caso del ensayo de continua, hay que poner la carcasa a tierra, durante un período de al menos, 5 min.